

Universidad del Norte

Departamento de Ingeniería Mecánica



Estimación de pérdidas por dobleces de lámina de acero al abrazar rodillos en líneas de proceso de acero plano

TESIS

Para la obtención del título de:
Magíster en Ingeniería Mecánica

Carlos Alfonso Barrios Quevedo

Barranquilla, Colombia
Septiembre de 2012

Universidad del Norte

Departamento de Ingeniería Mecánica



Estimación de pérdidas por dobleces de lámina de acero al abrazar rodillos en líneas de proceso de acero plano

Para la obtención del título de:
Magíster en Ingeniería Mecánica

Carlos Alfonso Barrios Quevedo

Trabajo dirigido por:

Marco E. Sanjuán, PhD.

Barranquilla, Colombia
Septiembre de 2012

A Dios que está sobre todas las cosas y a
quien debo todo lo que soy.

A mi esposa Alicia y mis hijos Andrea y
Andres quienes le dan sentido a mi vida

A mis padres y hermanos complemento
esencial de mis logros

A mis amigos con quienes siempre
cuento

Agradecimientos

Extiendo mi más sincero agradecimiento a la empresa ACERÍAS DE COLOMBIA S.A.S. por ser soporte económico, logístico y de tiempo para la realización de esta Maestría en Ingeniería mecánica que hoy da frutos con el presente trabajo de investigación.

Igualmente quiero expresar mi gratitud al Ingeniero Marco Sanjuan quien fue soporte y guía permanente durante la planeación y ejecución de la presente tesis.

TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción	1
1.1. Definición de Pérdida por doblez.....	1
1.2. Importancia de la estimación de Pérdidas.....	2
1.3. Descripción del problema.....	3
1.4. Objetivos.....	3
1.5. Metodología.....	3
2. Marco Teórico.....	5
2.1. Líneas de producción de acero plano.....	5
2.1.1. Tendencia industriales en proceso de acero plano.....	9
2.2. Mecanismos de pérdidas en sistemas de transporte de lámina.....	10
2.2.1. Rodillos deflectores.....	10
2.2.2. Rodillos de brida.....	10
2.2.3. Cepillos rotatorios.....	11
2.2.4. Rodillos exprimidores.....	11
2.3. Ecuaciones derivadas de la Ingeniería (EDI).....	13
3. Suavización de discontinuidad con lógica difusa.....	15
3.1. Caracterización de las EDI.....	15
3.1.1. Análisis para el rango de espesores gruesos.....	16
3.1.2. Análisis para el rango de espesores delgados.....	18
3.1.3. Ejemplo de discontinuidad con variación de ángulo.....	19
3.1.4. Discontinuidad con variación de espesor.....	20
3.2. Diseño de la transición difusa en regiones continuas.....	20
3.3. Definición de variables y parámetros del modelo Fuzzy.....	24
3.3.1. Variables rígidas.....	24
3.3.2. Variable lingüística.....	25
3.3.3. Universo de discurso.....	27
3.3.4. Funcion de pertenencia variables de entrada.....	27
3.3.5. Funciones de salida par PCH.....	29

3.3.6. Reglas.....	30
3.4. Regresión de la salida del modelo Sugeno.....	32
4. Desarrollo experimental de ecuaciones de pérdidas.....	37
4.1. Justificación abordaje experimental.....	37
4.2. Definición de variables.....	37
4.3. Diseño y construcción de un banco de ensayos.....	37
4.4. Descripción de la operación del banco de ensayos.....	43
4.5. Diseño experimental.....	43
4.6. Ejecución del experimento.....	45
4.7. Modelos de regresión para datos experimentales.....	49
5. Reflexiones y conclusiones.....	55
5.1. Dureza, factor no significativo.....	55
5.2. Comparación del antes con el ahora.....	55
5.3. Análisis de la diferencia entre los resultados de la DOE y la FUZZY.....	57
5.4. Análisis de desviaciones en las ecuaciones.....	59
5.5. Investigaciones futuras.....	60

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Pérdida por doblez de un lámina al abrazar un rodillo	2
Figura 2. Sección de Limpieza Típica de una línea de galvanizado	2
Figura 3. Posibilidades de proceso de acero plano para la construcción.....	5
Figura 4. Proceso de galvanizado en caliente para acero plano.....	6
Figura 5. Proceso de Decapado ácido para acero plano	7
Figura 6. Proceso de Recocido en continuo par acero plano ³	7
Figura 7. Adición de Pérdidas por doblez entre Bridas en la sección de Limpieza.....	8
Figura 8. Tanque de limpieza con cepillo rotatorio.....	11
Figura 9. Rodillos Exprimidores	12
Figura 10. Gráfica de pérdidas por dobleces en cintas de acero laminado en frío.....	17
Figura 11. Superficie de respuesta para pérdidas por dobleces – Espesores gruesos	18
Figura 12. Gráfica de pérdidas por dobleces en cintas de acero laminado en frío.....	18
Figura 13. Superficie de respuesta para pérdidas por dobleces – Espesores delgados	19
Figura 14. Grafica de la ecuación pérdidas específicas (Pe) con C_1D'/H	23
Figura 15. Acercamiento de Zona de transición de la discontinuidad.....	24
Figura 16. Visualización del dominio par suavización de las EDI.	25
Figura 17. Modelo Sugeno suavización de Pe.	27
Figura 18. Funciones de pertenencia para CDH.....	28
Figura 19. Función de pertenencia para CDH_i	28
Figura 20. Salida del sistema Sugeno Perdidas_1 con curva de ajuste.	30
Figura 21. Grafica de los valores de salida del Modelo Sugeno Perdidas_1	30
Figura 22. Comparación gráfica de ecuaciones antes y después de suavizar	31
Figura 23. Gráfica de Pérdidas Específicas al espesor, ecuación suavizada	35
Figura 24. Grafica de comparación cálculo de pérdidas específicas (EDI vs FUZZY).....	36
Figura 25. Diagrama de operación del Prototipo.	39
Figura 26. Diseño de Prototipo, vista general en 3D.....	41

<i>Figura 27. Diseño de Prototipo: Vista con acercamiento al sistema principal</i>	<i>42</i>
<i>Figura 28: Atributos de Diseño del experimento, tomado de StatGraphics.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 29. Perfil de dureza para lámina de 1.16 mm de espesor y 1,200 mm de ancho.</i>	<i>47</i>
<i>Figura 30. Comparación curvas ecuaciones EDI, FUZZY y DOE.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 31. Comparación curvas ecuaciones FUZZY y DOE.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 32. Ampliación de la zona de discontinuidad de las EDI</i>	<i>57</i>
<i>Figura 33. Gráfica comparativa de curvas con ecuaciones zona elástica y plástica</i>	<i>59</i>
<i>Figura 34. Gráfica comparativa de curvas para ecuaciones DOE y FUZZY</i>	<i>59</i>
<i>Figura 35. Grafico de Dispersión para desviaciones en respuesta de ecuaciones</i>	<i>60</i>

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Variables rígidas y su equivalente variable lingüísticas</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 2. Variables que afectan las pérdidas por dobleces</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 3. Coeficientes de correlación para los 54 datos.</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 4. Estadística de la regresión para estimación de datos faltantes.</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 5. ANOVA regresión para estimación de datos faltantes.</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 6. Resumen de coeficientes de regresión y error típico.</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 7. Datos faltantes estimados a partir de los otros datos experimentales</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 8. Cuadro comparativo de ANOVA's para modelos.</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 9. Valores estadísticos modelo multiplicativo de Potencias</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 10. ANOVA modelo multiplicativo de Potencias.</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 11. Coeficientes del modelo multiplicativo de Potencias.</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 12. Comparación de resultados sobre cálculo de pérdidas cuando se varía el espesor</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 13. Comparación de resultados sobre cálculo de pérdidas variando el espesor</i>	<i>58</i>

1. INTRODUCCIÓN

En toda línea de proceso continuo para la fabricación de acero o cualquier otro metal plano, es necesario contar con rodillos para la movilización de la cinta a través de los diferentes procesos a velocidades y tensiones apropiadas.

Los rodillos se pueden clasificar dependiendo de su función, en accionados y no accionados (locos), pero independiente de su clase, se requiere que la cinta tenga un contacto íntimo con la superficie en todo el ángulo de abrace, de lo contrario no se podrán generar deslizamientos que afectarían la calidad superficial de la lámina. Para garantizar este contacto efectivamente, hay que aplicar la tensión apropiada a la cinta.

1.1. Definición de Pérdida por doblez

En la figura 1 se representa una cinta de acero, pasando sobre un rodillo deflector que la posiciona para el proceso de exprimido, el cual requiere una tensión de T_p gracias al sistema de tracción. Como el doblar la lámina sobre el rodillo deflector en todo el ángulo de abrace (α), consume un trabajo, es necesario que el sistema de tracción realice un trabajo adicional para garantizar T_p , el cual expresado en tensión de lámina, es lo que se conoce con el nombre de pérdida por dobleces.

Si se cuenta con medidores de tensión a la entrada y salida del rodillo deflector la pérdida sería calculada como la diferencia entre estas tensiones, es decir,

$$\Delta T = T_p - T_i = \text{Pérdidas por doblez} \quad (1)$$

1.2. Importancia de la estimación de Pérdidas

Además de lo vital de saber qué tanta tensión, trabajo o potencia hay que aplicar a la cinta para compensar las pérdidas y lograr las tensiones adecuadas en el proceso, es necesario tenerlas en cuenta para el diseño de los equipos de tracción (Bridas), que en conjunto de otros equipos complementan lo que se denomina sistema de transporte.

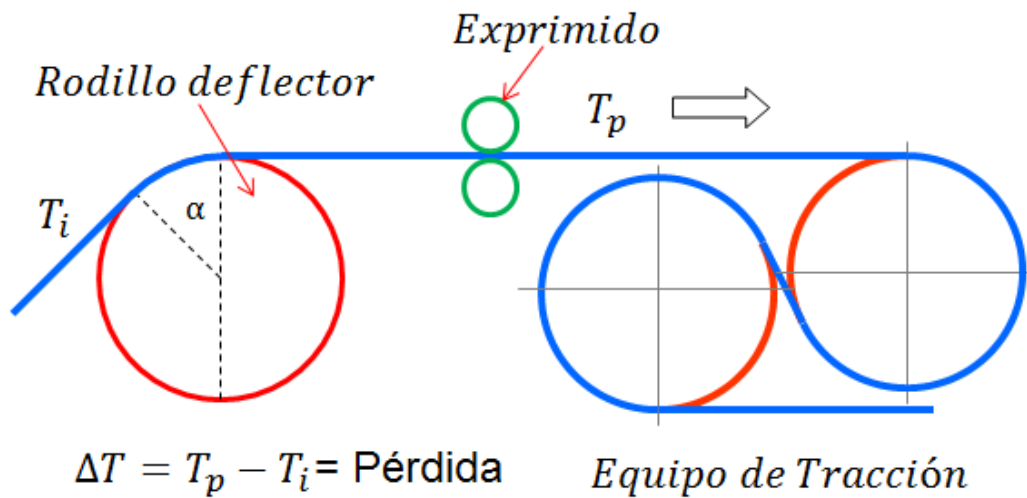


Figura 1. Pérdida por doblez de un lámina al abrazar un rodillo

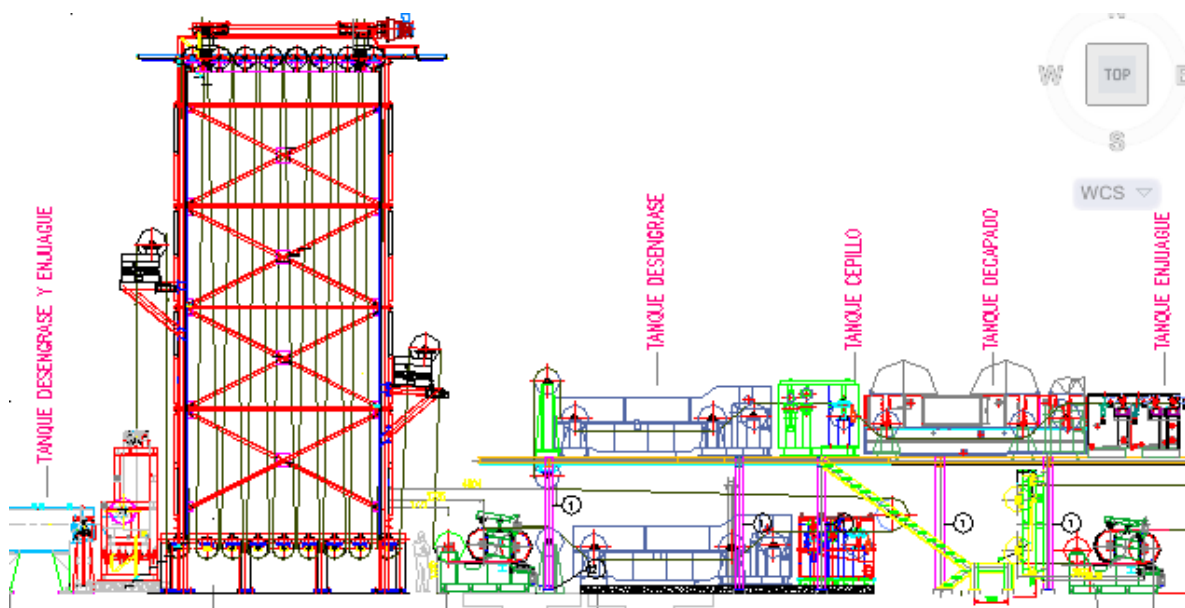


Figura 2. Sección de Limpieza Típica de una línea de galvanizado

Estas pérdidas son aditivas en toda la línea de producción y pueden ser representativas en ciertas partes del proceso donde se requiera mucho cambio de dirección en la cinta de acero. En la figura # 2 se muestra un diagrama típico de la sección de limpieza para una línea de galvanización; se puede observar la gran cantidad de rodillos instalados.

1.3. Descripción del Problema

Cuando se están diseñando líneas de proceso para acero plano, los Ingenieros calculistas requieren estimar pérdidas por dobleces para deducir la potencia de los motores y garantizar las tensiones requeridas en cada parte del proceso. Actualmente hay escasez de ecuaciones de dominio público y confiables para estimar las pérdidas y en algunos casos las empresas fabricantes de los equipos, desarrollan sus propias ecuaciones, pero no son divulgadas al público y forman parte de su know-how.

De otro lado, existen ecuaciones disponibles, derivadas de la práctica de la ingeniería, que se usan en empresas productoras de acero, pero no tienen un origen reconocido ni confiable. A esas ecuaciones las denominaremos Ecuaciones Derivadas de la Ingeniería (sigla: **EDI**) y se mostrará más adelante los inconvenientes de discontinuidades en el rango de variables particulares para las líneas de proceso del acero plano.

1.4. Objetivos

El enfoque principal de este proyecto de investigación es:

Desarrollar ecuaciones continuas en el rango de operación de las variables para estimación de pérdidas por dobleces en sistemas de transporte de láminas de acero.

Este objetivo general se alcanzará a través del cumplimiento de los siguientes objetivos específicos:

- Caracterizar las discontinuidades de las EDI.
- Proponer una ecuación modificada a la EDI implementando suavización de las regiones de transición con lógica difusa.
- Proponer una ecuación de estimación de pérdidas basado en el análisis experimental de la respuesta pérdidas en un banco de ensayos de doblez.

1.5. Metodología

Con el fin de caracterizar las zonas de discontinuidad de las EDI, se realizará una simulación matemática con el fin de elaborar gráficas que sirvan para visualizar y analizar las discontinuidades, dependiendo de los diferentes factores involucrados. Teniendo ya claridad sobre los valores de discontinuidad y su localización se

procederá a la suavización de las EDI utilizando lógica difusa. Posteriormente se diseñará un banco de ensayos para realizar experimentación y proponer una ecuación alternativa.

Finalmente se realizará experimentación en el banco de ensayos y propondrá una nueva ecuación basada en análisis estadístico de los resultados obtenidos.

Se concluirá este trabajo con una sección de reflexiones y conclusiones sobre las ecuaciones EDI, se compararán las provenientes de la suavización y las obtenidas de la experimentación, se compararán y se validarán sus rangos de aplicación.

2. MARCO TEÓRICO

Dentro de los tipos de línea de producción para el acero plano se pueden encontrar líneas o sub-procesos tales como desgrasado, preparación, estañado, galvanización, rebobinado, revestimiento, pulido y recocido entre otros. Existen también otros procesos para materiales planos no metálicos, tales como plásticos y telas, pero no son objeto de estudio en esta investigación. A continuación se dará una breve descripción sobre las generalidades de los procesos disponibles para el acero plano.

2.1. Líneas de producción de aceros planos

Como es de conocimiento público, existe gran variedad de aceros para cubrir todas las necesidades de la industria. Se pueden clasificar desde varios puntos de vista, incluyendo composición química, resistencia, maleabilidad, forma, resistencia a la corrosión, etc. Esta investigación estará focalizada en los aceros planos de bajo carbono (menos del 0.6%) que son usados normalmente para la construcción de bodegas, estructuras livianas, partes secundarias para automóviles y para la fabricación de electrodomésticos entre otros.

Aunque no es el único origen, la mayoría de las acerías de baja y mediana capacidad inician el proceso del acero a través de planchones, los cuales se calientan para ser laminados y convertirlos en bobinas (ver figura 3). Estas últimas, se pueden consumir principalmente para producir láminas galvanizadas o láminas o láminas crudas laminadas en frío, cuyos procesos incluyen el decapado (remoción de óxidos) y el laminado en frío.

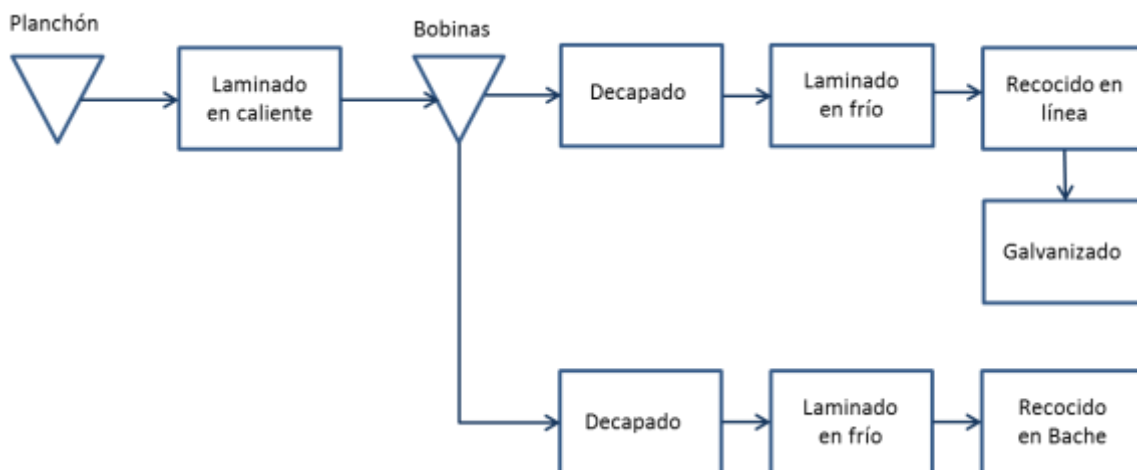


Figura 3. Posibilidades de proceso de acero plano para la construcción.

Las bobinas galvanizadas se pueden usar para la producción de techos, perfiles, tubería liviana y también como material de refuerzo en la fundición de losas en concreto. En cuanto a las bobinas laminadas en frío, pueden ser entregadas al mercado como crudas (Full Hard), o continuar su procesamiento en los hornos de recocido y en los trenes de laminación de temple, con el objetivo de modificar sus características metalúrgicas, mecánicas y, muy ligeramente, las geométricas. De esta manera, se obtienen Bobinas recocidas y/o procesadas en el Laminador de Temple, que podrán ser proporcionadas en Bobinas, cortadas a longitudes específicas (Láminas), o continuar procesos posteriores con recubrimiento electroquímico de cromo o estaño.

Como el presente estudio está relacionado con las pérdidas generadas por el abrace en rodillos, centraremos la descripción de líneas de proceso en aquellas donde se requiera una cantidad considerable de rodillería. Dos de los tipos de líneas que más cumplen con esta característica son los procesos continuos de decapado, recocido, estañado y galvanizado. Todas estas líneas se componen en general de tres partes¹: una sección entrada donde se desbobinan los rollos de materia prima y se prepara la superficie, una sección de tratamiento o proceso principal y una sección de salida donde se entrega y prepara el producto terminado en su presentación final. En la figura 4 se muestra un proceso típico de galvanizado, en la figura 5 uno de recocido y en la 6 otro de decapado; se han marcado en estas tres figuras las secciones comunes en los diferentes flujos de producción.

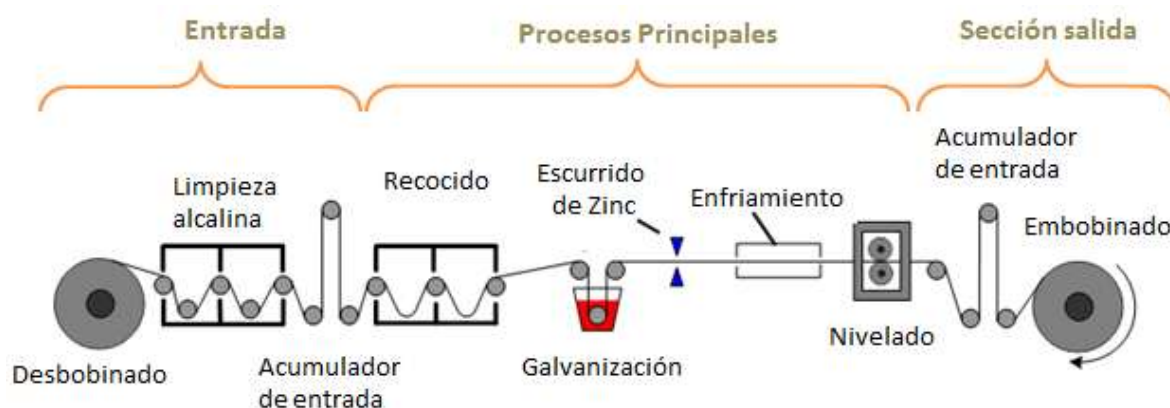


Figura 4. Proceso de galvanizado en caliente para acero plano²

¹ Serope Kalpakjian, Steven R. Schmid, Manufactura, ingeniería y tecnología , 5a Ed., Pearson Education, 2008

² Dr. Dmitri Kopeliovich. Steel strip processing, Junio 2 de 2012. Disponible en la Web: http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=steel_strip_processing

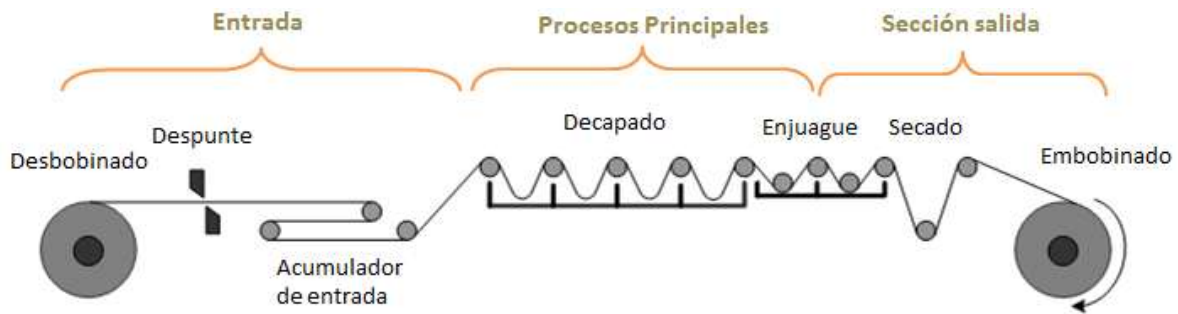


Figura 5. Proceso de Decapado ácido para acero plano³

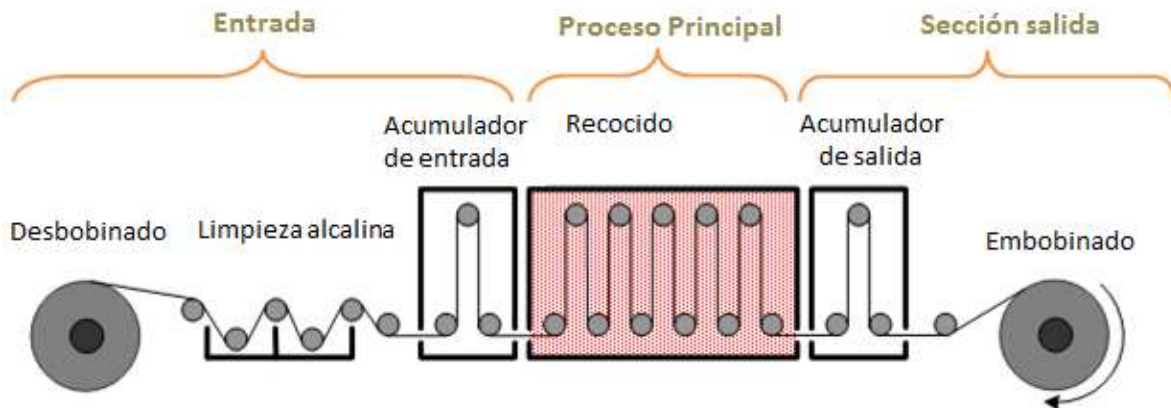


Figura 6. Proceso de Recocido en continuo para acero plano³

Cada proceso tiene sus particularidades, pero en común cuentan con una sección de entrada, donde se desbobina la materia prima, se une la punta y cola de las bobinas y en algunos casos se realiza un pre-tratamiento superficial pre-requisito de los procesos principales siguientes, que son la médula del flujo productivo. Al final todos estos procesos culminan con la sección de salida donde por lo general se realiza el embobinado del producto terminado, pero hay aplicaciones en las que se realizan post-tratamientos tales como, temper, nivelado por tensión y cromatizado, entre otros.

Por razones de construcción, operación de líneas y para evitar el deterioro del producto a procesar, es necesario cumplir las tensiones de cinta requeridas en las distintas secciones. Por ejemplo, es esencial tener una tensión unitaria de 0.5 Kg/mm^2 dentro de un horno de recocido para controlar el estiramiento. En el caso del embobinado, es necesaria una tensión entre 2 y 4 Kg/mm^2 con el fin de

³ Dr. Dmitri Kopeliovich. Steel strip processing, Junio 2 de 2012. Disponible en la Web: http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=steel_strip_processing

evitar que la bobina se colapse debido al almacenamiento vertical en las zonas de inventario.

Ahora, como se observa en la figura 7, las pérdidas (ΔT) en cada rodillo deben ser estimadas y contempladas al paso de la lámina por cada rodillo, ya que se vuelven aditivas a las tensiones de proceso. De esta manera, si se requiere saber cuanta tensión percibirá la Brida 3 en la entrada, será necesario sumarle a la tensión de salida de la Brida 1, todas las pérdidas por dobleces ocasionadas por los rodillos instalados entre estos dos equipos. Es decir:

$$T_{EB2} = T_{SB1} + \Delta T_{total}$$

Y:

$$\Delta T_{total} = \sum_{i=1}^{17} \Delta T_i,$$

Siendo,

T_{SB1} : Tensión salida Brida 1

T_{EB2} : Tensión entrada Brida 2

ΔT_{total} = Pérdidas totales entre Brida 1 y Brida 2

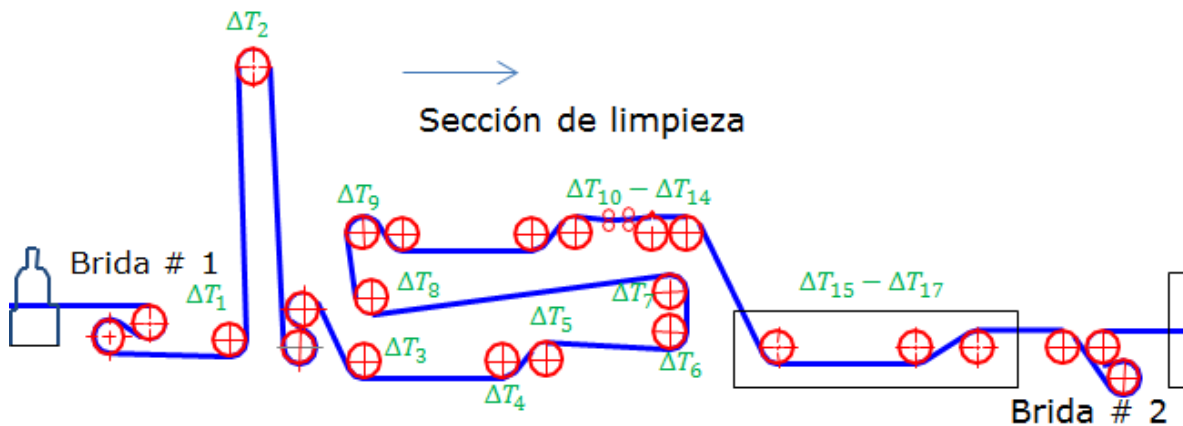


Figura 7. Adición de Pérdidas por doblez entre Bridas en la sección de Limpieza

De otro lado, el control de velocidad y el guiado de la lámina a lo largo de la línea son fundamentales también para conservar la calidad del producto y realizar los sub-procesos ejecutados en cada sección. Por ejemplo, si en una línea de galvanizado se sobrepasa la velocidad en la sección de recocido, el material podría tener una dureza mayor a la especificada para cierto producto y también si

en la misma línea falla el guiado en la sección de embobinado se podría tener una bobina con bordes salidos en el producto terminado.

Es muy importante que se conozcan algunas disposiciones que toma la industria de acero en torno a la estimación de pérdidas dependiendo de la razón social de la empresa. A continuación se muestran algunas tendencias particulares.

2.1.1. Tendencias Industriales en proceso de acero plano

El sector del acero se ha caracterizado por las constantes innovaciones desarrolladas durante las últimas décadas en sus procesos de producción, lo que ha significado una revolución tecnológica desde el punto de vista productivo y de calidad. En la actualidad, la actividad innovadora del sector continúa y seguirá en el futuro en términos de simplificación de los procesos, obtención de nuevas calidades, control avanzado de los procesos y tecnologías de superficies, buscando siempre soluciones que contribuyan al desarrollo sostenible.

Muchos de estos esfuerzos se encaminan específicamente en el transporte del acero entre las diferentes partes de su proceso, ya que es el mayor causante de los problemas de calidad y paradas no programadas. Es por esto que la mayoría de las compañías elaboran sus propios modelos matemáticos y/o experimentales para alcanzar controles de velocidad, tensión y guiado cada vez más confiables y generadores de ahorros en costos. Las ecuaciones de pérdidas que usan para el control y diseño de equipos, son por lo tanto desarrollos internos que forman parte de su know-how y no están disponibles comercialmente, a no ser que se adquieran líneas de proceso con la modalidad llave en mano.

Como ejemplo de lo anterior, en el anexo 1 se puede observar la descripción de un caso de estudio realizado por la empresa **ApICS LLC Consultants**, que fue contratada por una compañía productora de acero, requiriendo estimar las pérdidas por dobleces en una línea de decapado que produce acero con 6 mm de espesor. En este modelo se hace un desarrollo interesante con la incorporación de la velocidad de la cinta y las porciones elásticas y plásticas en todo el espesor. Lo único negativo con este estudio es que no relaciona el ángulo de abrace como una variable y en la práctica se sabe que a mayor ángulo mayor será la pérdida.

El otro aspecto a revisar con los modelos matemáticos, son el hecho de que su comportamiento no será igual si se está usando para una línea de producción de foil de aluminio que para una línea de pulido de acero inoxidable. Igualmente, aunque se tratara del mismo material, las grandes diferencias entre los espesores y anchos del mercado, proponen cambios fundamentales que motivan a confiar en modelos provenientes de procesos experimentales.

Finalmente es importante comentar que en la actualidad se cuenta con medidores de tensión muy precisos (celdas de carga) que pueden ser instalados sobre ciertos rodillos para conocer la tensión exacta y retroalimentar a sistema de control. En un caso hipotético en el que el dinero no fuera límite (US\$ 10,000 – US\$ 50,000/celda) y que el costo del material lo amerite, se podrían instalar celdas de carga en cada punto de interés y así no sería necesario estimar las pérdidas por dobleces, ya que el sistema de control enviaría la orden a cada brida para que a través de variación de potencia se alcance el valor de tensión deseada. Sin embargo, esto no aplica cuando se requiera agregar un nuevo proceso a la línea que involucre la instalación de rodillera adicional o se esté diseñando una nueva línea.

Se han descrito hasta ahora los procesos de aceros planos y sus similitudes en cuanto a configuración, secciones y algunas especificaciones técnicas. En la siguiente sección de enunciarán y definirán los diferentes mecanismos de pérdidas de energía involucrados en el sistema de transporte de la lámina, que deben ser estimados rigurosamente para poder calcular la potencia de los motores y hacer una selección apropiada de los mismos.

2.2. Mecanismos de pérdidas en sistemas de transporte de lámina.

El sistema de transporte de una línea de proceso es el responsable de que el tránsito de la lámina por toda la línea se de a velocidades y tensiones adecuadas a través de rodillos, que son la única parte móvil que toca la lámina en todo su recorrido por el proceso. Estos, por lo tanto son los generadores directos de las pérdidas, cuyos valores dependerán de la función de cada uno.

2.2.1. Rodillos deflectores: Sirven para cambiar la dirección de la lámina y para ajustar la línea de paso, de acuerdo con los requerimientos de los diferentes procesos de la línea. En la figura 1 se puede observar un ejemplo de rodillo deflector. Las pérdidas son principalmente causadas por la flexión de la porción de lámina para en todo el ángulo de abrace del rodillo.

2.2.2. **Rodillos de Brida:** en la sección 1.2. se trató brevemente sobre los equipos de tracción (Bridas), los que principalmente se encargan de generar tracción en la lámina a través de halarla y frenarla, estando en contacto íntimo con la superficie de los rodillos. En la figura 7 se observa el diseño típico de una brida, la cual está conformada por dos rodillos (las hay de hasta cuatro) y dos sistemas motrices (conjunto Motor y reductor). En la figura 1, se puede observar la configuración tipo “S” de los rodillos, la cual es la más comúnmente usada en la industria del acero, por tener alto ángulo de abrace y por lo tanto mayor capacidad de arrastre.

En condiciones estacionarias, las pérdidas más evidentes se generan por el dobléz (abrace de rodillos), la fricción entre la lámina y la superficie del rodillo y la fricción entre las partes móviles. Existen aquí otras pérdidas más difíciles de estimar y que están relacionadas con las ineficiencias de los motores, reductores, acoples y variadores de frecuencia.

2.2.3. **Cepillos rotatorios:** Su función principal es la limpiar la superficie de la lámina para remover suciedad adherida, aceites de laminación y los finos de hierro presentes por la laminación en frío del acero usado como materia prima. En la figura 8 se observa que estos sistemas de limpieza cuentan con un cepillo rotatorio (giro opuesto al sentido del proceso) y un rodillo de apoyo. La lámina pasa por la mitad de los dos rodillos y es limpiada en una de las caras. La otra superficie se limpia en un conjunto de cepillos con una configuración inversa.

Las pérdidas en este caso se dan por el frenado que genera el rozamiento del cepillo rotatorio con la superficie de la lámina y por la pequeña flexión que se presenta sobre el rodillo de apoyo.

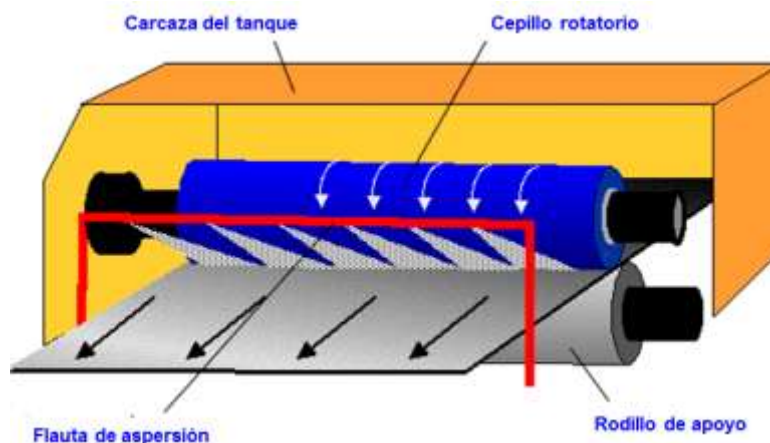


Figura 8. Tanque de limpieza con cepillo rotatorio

2.2.4. **Rodillos Exprimidores:** al final de cada proceso (desengrasante, pasivado, enfriamiento) que involucre el uso de líquidos se requiere instalar un sistema de exprimido para remover el exceso de solución y evitar contaminación de los procesos subsecuentes. La configuración estándar es de dos rodillos en arreglo vertical que se presionan opuestamente con actuadores (neumáticos, hidráulicos o eléctricos) para lograr una compresión en la capa de líquido que está sobre la lámina y requiere ser removida. Ver gráfico ilustrativo en la figura 9. En este caso la pérdida se da por el aplastamiento del caucho contra las dos caras de la lámina y por la fricción incrementada en los rodamientos de los rodillos.

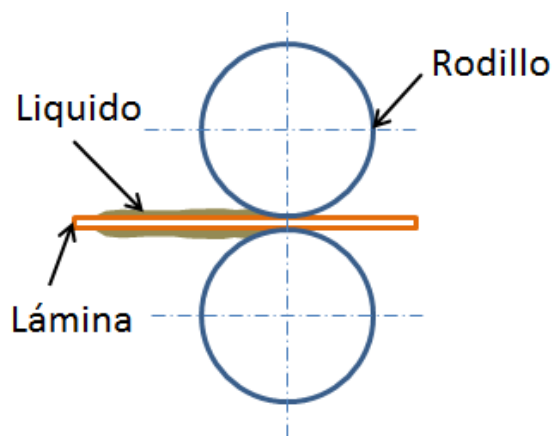


Figura 9. Rodillos Exprimidores

Como complemento a la descripción de los mecanismos de pérdida, es procedente en este punto de la investigación, analizar el fenómeno de pérdidas desde el punto de vista energético. Dichas pérdidas están relacionadas con los cambios en la energía potencial que sufre la lámina al flexionarse durante su paso por el rodillo. La ecuación del balance de energía que gobierna este fenómeno es⁴:

$$\Pi = U + \Omega \quad (2)$$

De donde:

Π : Energía potencial total de un cuerpo

U : Energía de deformación por fuerzas internas

⁴ Eduard Ventse, Theodor Krauthammer. Thin Plates and Shells Theory, Analysis, and Applications, 1a ed, Marcel Dekker, 2001.

Ω : Energía de deformación por fuerzas externas

Por convención, asumamos que Π_0 es la energía potencial antes de la deformación, la cual es cero. Entonces Π representaría la variación de la energía potencial (interna y externa) en la transición del estado inicial al deformado.

Si se aplica la ecuación 2 al interés de esta investigación, se puede entender por fuerzas internas las generadas debido a la tensión de la lámina ante de su paso por el rodillo (estado plano) y las fuerzas externas, aquellas que ocurren por la flexión sobre el rodillo (estado abraza). Por lo tanto, Ω representa el trabajo necesario “externo” para obligar a la lámina a abrazar el rodillo, lo que se hace equivalente a las pérdidas por dobleces.

La presente investigación se concentrará solo en el mecanismo de pérdidas por dobleces en rodillos deflectores, pero también queda cubierto parcialmente el segundo mecanismo (Bridas) ya que sus rodillos se comportan también como deflectores. Las ecuaciones que se usan para este tipo de mecanismo no aplican para los otros. Entonces No se realizará un modelamiento basado en principios fundamentales del mecanismo de pérdidas, sino la estimación a través de ecuaciones obtenidas por medios experimentales o el ajuste de ecuaciones existentes.

2.3. Ecuaciones derivadas de la Ingeniería (EDI)

Estas ecuaciones fueron desarrolladas en la práctica normal de la ingeniería y como se comentó en el numeral 1.3, se desconoce su origen. La aplicabilidad está limitada a láminas de acero y consideran que la lámina se encuentra en un estado estacionario, sin contemplar las fuerzas internas (U). Las fórmulas con las que se calculan las pérdidas por dobleces son:

$$H_1 = \frac{D' \cdot T_f}{E} \quad (3)$$

$$P = \left(\frac{2bt_t}{D'} \right) \left(\frac{3H^2 - H_1^2}{12} \right) \quad (4)$$

Angulo Abraza	Díámetro de calculo
$45^\circ \leq x$	$D' = D$
$20^\circ \leq x < 45^\circ$	$D' = 2D$
$10^\circ \leq x < 20^\circ$	$D' = 3D$
$x < 10^\circ$	$D' = 4D$

(5)

$$\text{Si } (3H^2 - H_1^2) < 0, H_1 = H \quad (6)$$

Siendo:

- D: diámetro real del rodillo (mm)
- D': Diámetro de cálculo del rodillo (mm)
- T_f: Límite elástico del acero (Kgf/mm²)
- E. Módulo elástico (Kgf/mm²)
- b: Ancho de la cinta (mm)
- H: Espesor de la cinta (mm)
- P: Pérdida por doblez (Kgf)

El cálculo de las pérdidas usando las EDI, proporciona resultados razonables cuando se mantiene constante el ángulo de abrace y el valor de la expresión $3H^2 - H_1^2$ se hace positiva. Sin embargo, por fuera de estas condiciones las ecuaciones presentan un comportamiento inadecuado mostrando saltos y discontinuidades que serán caracterizadas en el siguiente capítulo.

3. SUAVIZACION DE DISCONTINUIDAD CON LOGICA DIFUSA

En este capítulo se plantea como objetivo final el re-diseño de unas ecuaciones EDI (Ecuaciones derivadas de la ingeniería) utilizando la lógica difusa. Se iniciará con una caracterización de los inconvenientes presentes con las EDI, luego se modificará su estructura para simplificarlas y facilitar su uso. Finalmente se corregirán las discontinuidades para obtener unas ecuaciones continuas, a través de la suavización con lógica difusa.

3.1. Caracterización de las EDI.

Es necesario retomar en esta sección las ecuaciones para analizar con mayor detalle sus parámetros:

$$H_1 = \frac{D' \cdot T_f}{E} \quad (3)$$

$$P = \left(\frac{2bT_t}{D'} \right) \left(\frac{3H^2 - H_1^2}{12} \right) \quad (4)$$

Angulo Abrace	Diámetro de calculo
$45^\circ \leq x$	$D' = D$
$20^\circ \leq x < 45^\circ$	$D' = 2D$
$10^\circ \leq x < 20^\circ$	$D' = 3D$
$x < 10^\circ$	$D' = 4D$

$$\text{Si } (3H^2 - H_1^2) < 0, H_1 = H \quad (6)$$

Siendo:

- D: diámetro real del rodillo (mm)
- D': Diámetro de cálculo del rodillo (mm)
- T_f: Límite elástico del acero (Kgf/mm²)
- E. Módulo elástico (Kgf/mm²)
- b: Ancho de la cinta (mm)
- H: Espesor de la cinta (mm)
- P: Pérdida por doblez (Kgf)

El factor D' , que se define como el diámetro de cálculo, tiene como función reemplazar el diámetro real del rodillo dependiendo del ángulo de abrace. De esa manera se incluye indirectamente el ángulo de abrace en la ecuación principal de pérdidas (3), lo cual conceptualmente es correcto, ya que, desde el punto de vista de las pérdidas, tener un ángulo pequeño de abrace es equivalente a tener un rodillo de gran diámetro.

En el caso del parámetro H_1 , el cual no viene definido en términos de nomenclatura, se puede interpretar como un factor que disminuye o aumenta las pérdidas dependiendo de la resistencia a la fluencia del acero que ese esté procesando, ya que el módulo elástico (modulo de Young) es casi constante para todos los aceros. De la misma manera, H_1 incorpora el efecto del ángulo de abrace en términos del diámetro real.

De otro lado, la ecuación (5) establece un condicional para manejar el resultado de la expresión $(3H^2 - H_1^2)$, ya que si $H_1^2 \geq 3H^2$, entonces las pérdidas serían cero o negativas, lo cual sería incorrecto.

Con lo que se ha descrito hasta ahora de las EDI, se puede evidenciar que hay dos factores que pueden generar saltos o discontinuidades. Uno es el ángulo de abrace, que como se muestra en la ecuación (4) propone saltos en múltiplos de D . El otro factor que promueve discontinuidad es el espesor (H), ya que cuando la expresión $(3H^2 - H_1^2)$ se hace cero o negativa, $H_1 = H$.

Con el fin de caracterizar y evaluar estas discontinuidades se realizó un análisis paramétrico en Excel, variando alternativamente los valores de estos factores y dejando constante el resto de variables. Se tomaron como ejemplo valores típicos en una línea de galvanizado para acero calidad comercial, donde se procesan espesores de lámina entre 0.20 y 2.0 mm. Con el fin facilitar la visualización de las gráficas, se decidió separar el análisis en dos rangos de espesores; los gruesos que van desde 1.2 a 2.0 mm y los delgados entre 0.2 y 1.0 mm. Esta caracterización se describe a continuación.

3.1.1. Análisis para el rango de Espesores Gruesos.

En la figura 10 se observa el comportamiento de la ecuación EDI para acero laminado en frío de 1,220 mm de ancho y espesores gruesos, con respecto al ángulo de abrace sobre rodillos de 500 mm de diámetro. Los ángulos de abrace se variaron con incrementos de 5° y se realizaron gráficas iguales para anchos de 914 y 1.000 mm, pero se encontró el mismo comportamiento, así que se usará el ancho de 1,220 mm como ilustración generalizada. En la figura 11, se muestra la superficie de respuesta obtenida a partir de los mismos datos de la figura 10.

De las figuras 10 y 11 se observa un mismo comportamiento para todos los espesores gruesos con ángulos de abrace menores de 15°, es decir, la pérdida aumenta si el ángulo también lo hace. Entre 15 y 20°, los espesores mayores (1.6 y 2.0 mm) presentan ilógicamente disminución en la pérdida con el aumento del ángulo de abrace (ver discontinuidad 1 en figura 10), mientras que en el caso de los espesores más livianos (1.2 y 1.4 mm) ocurre un comportamiento opuesto, pero racional.

Si se analiza ahora el rango de ángulo [20°, 40°] se observa que para todos los espesores gruesos las pérdidas se mantienen prácticamente constantes. Sin embargo este comportamiento resulta ser también extraño, ya que a medida que se incrementa el ángulo deberían aumentar las pérdidas.

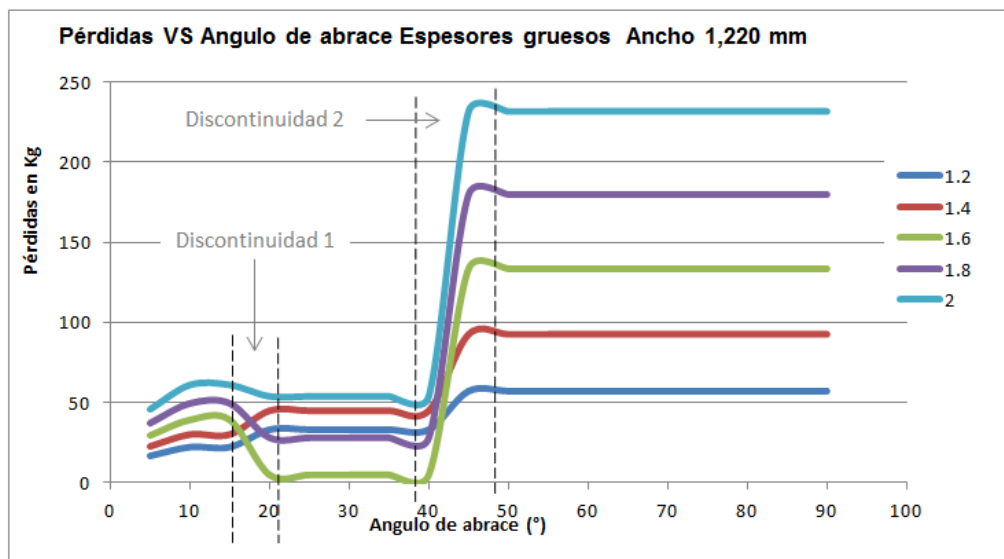


Figura 10. Gráfica de pérdidas por dobleces en cintas de acero laminado en frío.

Finalmente, en el rango de ángulo [40 45] se presenta un salto hacia arriba en el valor de las pérdidas (ver discontinuidad 2 en figura 10), siendo la dirección del cambio correcta pero no su magnitud.

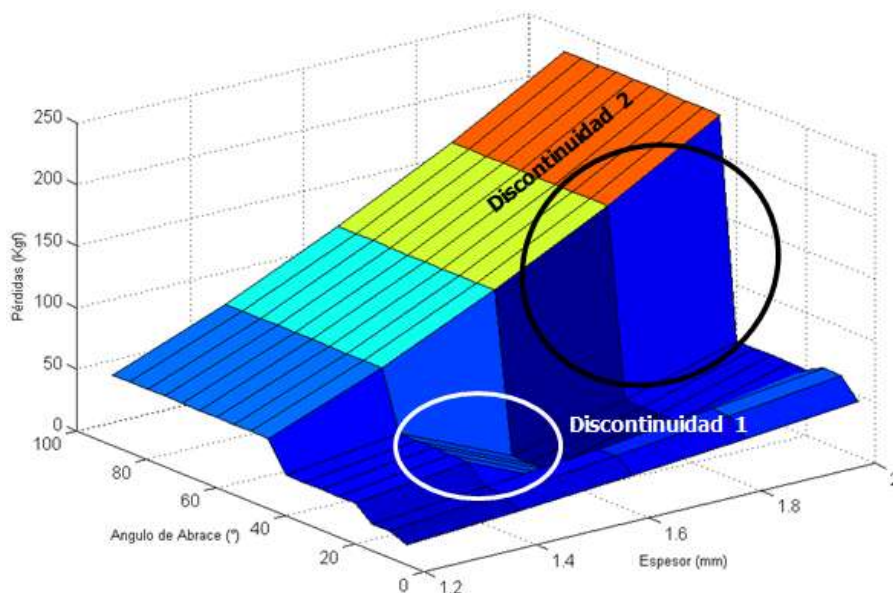


Figura 11. Superficie de respuesta para pérdidas por dobleces – Espesores gruesos

3.1.2. Análisis para el rango de Espesores Delgados.

En las figuras 12 y 13 se muestra el comportamiento de las pérdidas para espesores de 0.2 a 1.0 mm, ancho de 1,220 mm, diámetro de 500 mm con variaciones de 5° en el ángulo de abrace. Al igual que en el caso de los espesores gruesos en general se observa que en la mayoría de los espesores las pérdidas se incrementan con ángulos de abrace mayores. Igualmente a mayor espesor los saltos son más grandes.

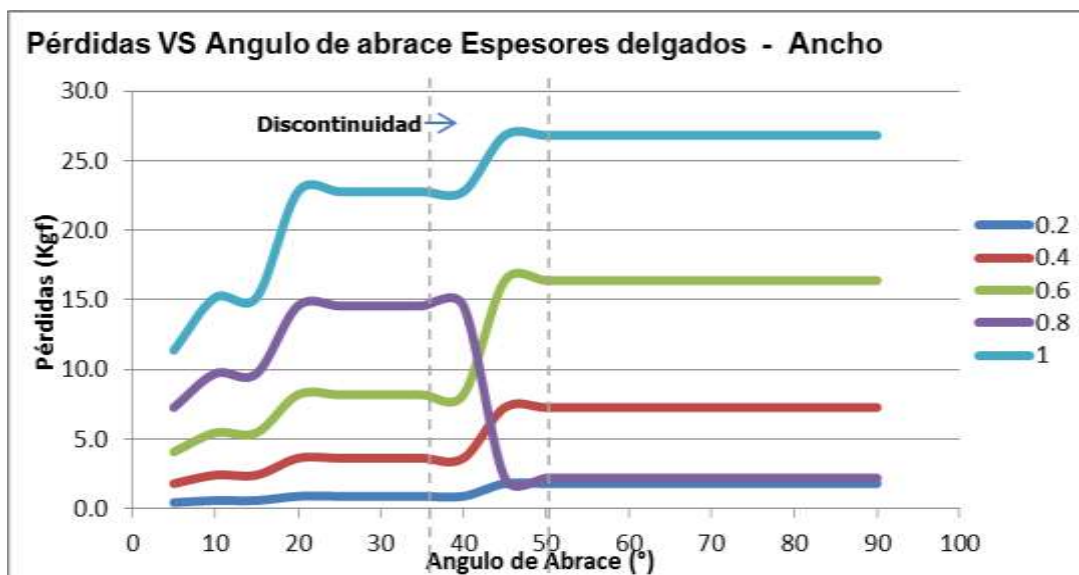


Figura 12. Gráfica de pérdidas por dobleces en cintas de acero laminado en frío.

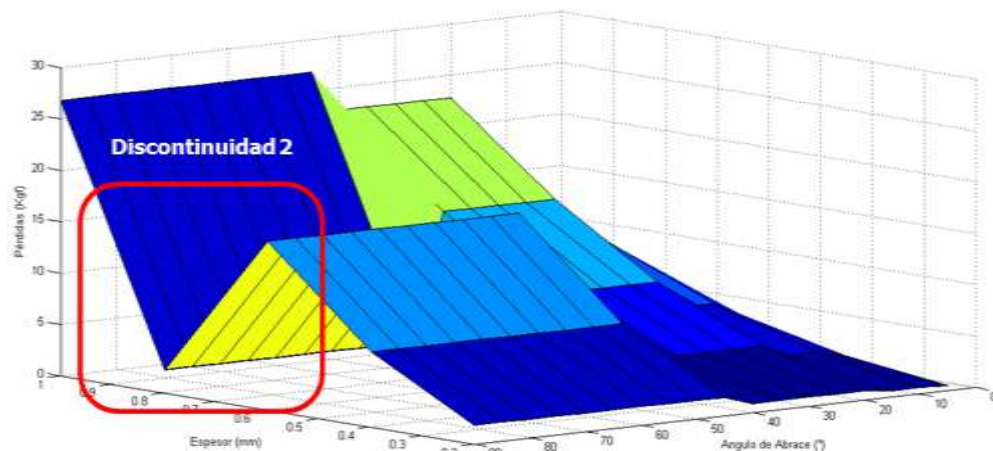


Figura 13. Superficie de respuesta para pérdidas por dobleces – Espesores delgados

Con excepción del espesor 0.8 mm, en todas las gráficas se presentan los saltos esperados en las fronteras de los intervalos de variación del ángulo de abrace. Sin embargo es enigmático el cambio del signo de la pendiente a partir de ángulos de abrazes superiores a 45°, disminuyéndose drásticamente (siete veces aproximadamente), y prácticamente igualándose a las del espesor 0.2 mm, que es cuatro veces inferior en tamaño. Con este acontecimiento se empieza a ver que no solo el ángulo de abrace causa saltos, sino que también para algunos valores, el espesor (por lo menos 0.8 mm) lo hace. Adicionalmente, se observa que el signo de la pendiente de cambio es diferente del esperado.

Finalmente, con el fin de describir el comportamiento de las EDI aplicadas a un caso real de la industria, vamos a representar el efecto de las discontinuidades con un par de ejemplos que muestran claramente que tan perjudiciales pueden ser los resultados.

3.1.3. Ejemplo de discontinuidad con la variación de ángulo.

Con este ejemplo se quiere analizar las desviaciones que sufre la estimación de pérdidas con variaciones pequeñas del ángulo. Los datos utilizados fueron:

$D = 500 \text{ mm}$

$T_f = 56 \text{ Kg/mm}^2$ Acero laminado en frío sin recocido

$E = 20,000 \text{ Kg/mm}^2$ Acero laminado en frío ASTM 1006

$b = 1.220 \text{ mm}$

$$H = 1.7 \text{ mm}$$

Aplicando las ecuaciones de la 3 a la 6, las pérdidas para un ángulo de abrace de 44° serían de 10 Kgf, sin embargo para un ángulo de 45° cambia a 153 Kgf, es decir, que con solo un incremento de 1° en el ángulo de abrace, la pérdida sube más de quince veces, lo cual se aleja de la realidad.

3.1.4. Discontinuidad con variación de espesor ($3H^2 - H_1^2$ negativa)

Con este ejemplo se quiere analizar las desviaciones que sufre la estimación de pérdidas con variaciones pequeñas del espesor. Los datos utilizados fueron:

$$D = 500 \text{ mm}$$

$$T_f = 56 \text{ Kgf/mm}^2 \text{ Acero laminado en frío no recocido}$$

$$E = 20,000 \text{ Kgf/mm}^2 \text{ Acero laminado en frío ASTM 1006}$$

$$b = 1.220 \text{ mm}$$

$$H = H_1 = 1.60 \text{ mm}$$

$$\text{Ángulo de abrace: } 44^\circ$$

Con estas condiciones la pérdida por doblez resulta ser 58 Kgf, pero si incrementamos el espesor en 0.02 mm, manteniendo el resto de parámetros iguales, la pérdida contrario a lo que se espera, cae a 0.38 Kgf haciéndose prácticamente nula.

Las altas variaciones mostradas en los dos ejemplos de arriba y el análisis gráfico anterior, demuestran que las ecuaciones EDI no estiman las pérdidas con valores razonables en las zonas de discontinuidad. Hay que tener presente que en el caso de una línea de proceso típica, como la de galvanizado en continuo, pueden existir más de 80 rodillos participando en el transporte de la cinta, así el uso de estas ecuaciones en la industria puede llegar a ser nefasto.

A continuación se establecerán unas ecuaciones de transición en las zonas discontinuas de las EDI para que puedan ser usadas por la industria.

3.2. Diseño de la transición difusa en regiones discontinuas

Una vez caracterizadas las discontinuidades en los numerales anteriores, el objetivo ahora es encontrar una ecuación que aplique para las zonas de discontinuidad y se integre con las ecuaciones EDI, esto se puede lograr a través

de suavización con Lógica Difusa, la cual propone conceptos apropiados cuando se trata de ambigüedad y zonas difusas.

Para proceder con la suavización es necesario modificar la estructura de las EDI para simplificar y poder representar una sola discontinuidad que cubra los dos factores de generación de la misma.

Se sabe que dos factores determinantes de las discontinuidades son el espesor y el ángulo de abrace, pero este último no aparece en la ecuación de P, sino que su valor condiciona a D'. Es por esto que el desarrollo matemático que sigue buscará simplificar las EDI en términos de H y D'.

Simplificación de la estructura de las Ecuaciones derivadas de la Ingeniería

A continuación se presenta el análisis matemático para realizar la simplificación requerida:

Se sabe que:

$$H_1 = \frac{D' t_f}{E}$$

Y si se crea una constante adimensional:

$$C_1 = \frac{t_f}{E} \quad (7)$$

Resulta en que:

$$H_1 = C_1 D', \quad (8)$$

pero hay que tener en cuenta que:

$$H_1 = \begin{cases} \frac{D' t_f}{E} & \text{si } (3H^2 - H_1^2) \geq 0, \\ H & \text{si } (3H^2 - H_1^2) < 0, \end{cases} \quad (9)$$

Ahora, si además se hace:

$$Z = (3H^2 - H_1^2) \quad (10)$$

y se combina con la ecuación (8), resulta en:

$$H_1 = \begin{cases} C_1 D' & \text{si } Z \geq 0, \text{ es decir, } \frac{C_1 D'}{H} \leq \sqrt{3} \\ H & \text{si } Z < 0, \text{ es decir, } \frac{C_1 D'}{H} > \sqrt{3} \end{cases} \quad (11)$$

Hagamos ahora:

$$C_2 = \frac{b t_f}{6}, \quad (12)$$

que si se reemplazada en la ecuación (3) del capítulo 1, se obtiene:

$$P = \frac{C_2 (3H^2 - H_1^2)}{D'} \quad (13)$$

Ahora, Para $Z \geq 0$, se tiene que:

$$\begin{aligned} P &= \frac{C_2 (3H^2 - H_1^2)}{D'} = \frac{C_2 (3H^2 - C_1^2 D'^2)}{D'} = \frac{3C_2 H^2 - C_1^2 C_2 D'^2}{D'} \\ P &= \frac{3C_2 H^2}{D'} - \frac{C_1^2 C_2 D'^2}{D'} = \frac{3C_2 H^2}{D'} - C_1 C_2 H \left(\frac{C_1 D'}{H} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

Nótese que $\frac{C_1 D'}{H}$ es la variable que se está buscando para expresar la ecuación de P, ya que relaciona tanto el ángulo de abrace (con D') y el espesor (H).

Para $Z < 0$:

$$P = \frac{C_2 (3H^2 - H_1^2)}{D'} = \frac{2C_2 H^2}{D'} = \frac{2C_1 C_2 H^2}{C_1 D'} = \frac{2C_1 C_2 H}{\left(\frac{C_1 D'}{H} \right)} \quad (15)$$

En resumen, combinando (13) y (14), se puede describir la ecuación de pérdidas como:

$$P = \begin{cases} \frac{3C_2 H^2}{D'} - C_1 C_2 H \left(\frac{C_1 D'}{H} \right) & \text{si } \frac{C_1 D'}{H} \leq \sqrt{3} \\ \frac{2C_1 C_2 H}{\left(\frac{C_1 D'}{H} \right)} & \text{si } \frac{C_1 D'}{H} > \sqrt{3} \end{cases} \quad (16)$$

Si se escribe la ecuación (15) con respecto al espesor y a las constantes C_1 y C_2 , y se denomina P_e como la pérdida específica, se obtiene la ecuación (16) donde las pérdidas se expresan en función de una sola variable, lo cual resultará apropiado para el proceso de interferencia con lógica difusa.

$$P_e = \frac{P}{C_1 C_2 H} = \begin{cases} \frac{3}{\left(\frac{C_1 D'}{H} \right)} - \left(\frac{C_1 D'}{H} \right) & \text{si } \frac{C_1 D'}{H} \leq \sqrt{3} \\ \frac{2}{\left(\frac{C_1 D'}{H} \right)} & \text{si } \frac{C_1 D'}{H} > \sqrt{3} \end{cases} \quad (17)$$

La gráfica de la ecuación (16) se observa en la figura # 14. En esta se puede determinar que efectivamente las pérdidas van disminuyendo a medida que aumenta $\left(\frac{C_1 D'}{H} \right)$ hasta llegar a cero en el valor crítico de $\sqrt{3}$. Se observa un salto ascendente en las pérdidas en ese mismo valor de $\left(\frac{C_1 D'}{H} \right)$ y luego se mantiene con un comportamiento ligeramente descendente.

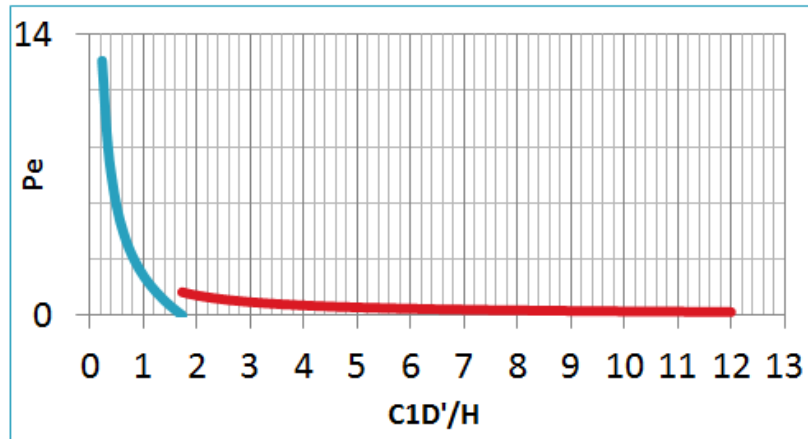


Figura 14. Gráfica de la ecuación pérdidas específicas (P_e) con $C_1 D'/H$

En la figura 15 se hace un acercamiento en la zona de discontinuidad.

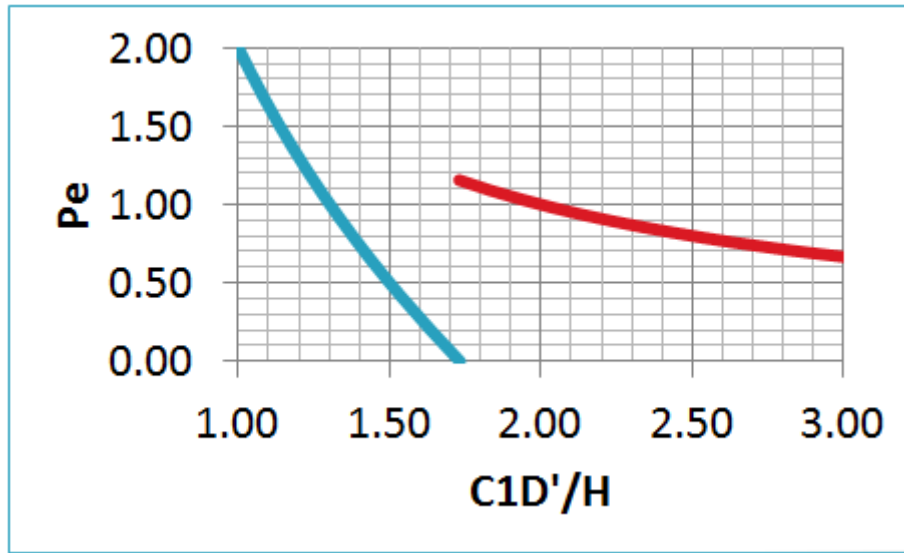


Figura 15. Acercamiento de Zona de transición de la discontinuidad

Con la ecuación (16) y las figuras 14 y 15 se cumple el objetivo de simplificar las EDI para poder representar una discontinuidad que cubra los efectos del ángulo de abrace y el espesor de lámina.

El hecho de que la curva para los valores bajos (izquierda, línea color azul en la figura 15) cruce el eje horizontal e indique que las pérdidas pueden ser cero, lleva a pensar que el comportamiento de descenso debe ser menos pronunciado y por lo tanto el dominio del modelo difuso debe tener su punto central en la intersección de las dos curvas.

Si se reemplaza $\frac{CD'}{H}$ por x , las dos ecuaciones que conforman la de P_e se pueden escribir como:

$$P_e = \frac{3}{x} - x, \text{ si } x \leq \sqrt{3} \quad (18)$$

$$P_e = \frac{2}{x}, \text{ si } x > \sqrt{3} \quad (19)$$

Ahora, para hallar la intersección de estas dos ecuaciones, las igualamos y quedan de la siguiente manera:

$$\frac{3}{x} - x = \frac{2}{x},$$

lo que se puede escribir como:

$$\frac{3-x^2}{x} = \frac{2}{x}$$

y resulta en que:

$$x = 1 \text{ (figura 16)}$$

Se tomará inicialmente un intervalo del $\pm 20\%$ alrededor de la intersección (ver figura 16) para la evaluación de la zona difusa. Posteriormente, si se encontrase que el 20% no es suficiente para desarrollar una transición adecuada, esta región podría ser susceptible de ampliación.

Con base en lo observado anteriormente se definen las siguientes variables:

3.3. Definición de variables y parámetros del modelo Fuzzy:

Paralelo a la definición de variables es importante aclarar algunos conceptos básicos de Lógica difusa, tal como se trata en las siguientes secciones.

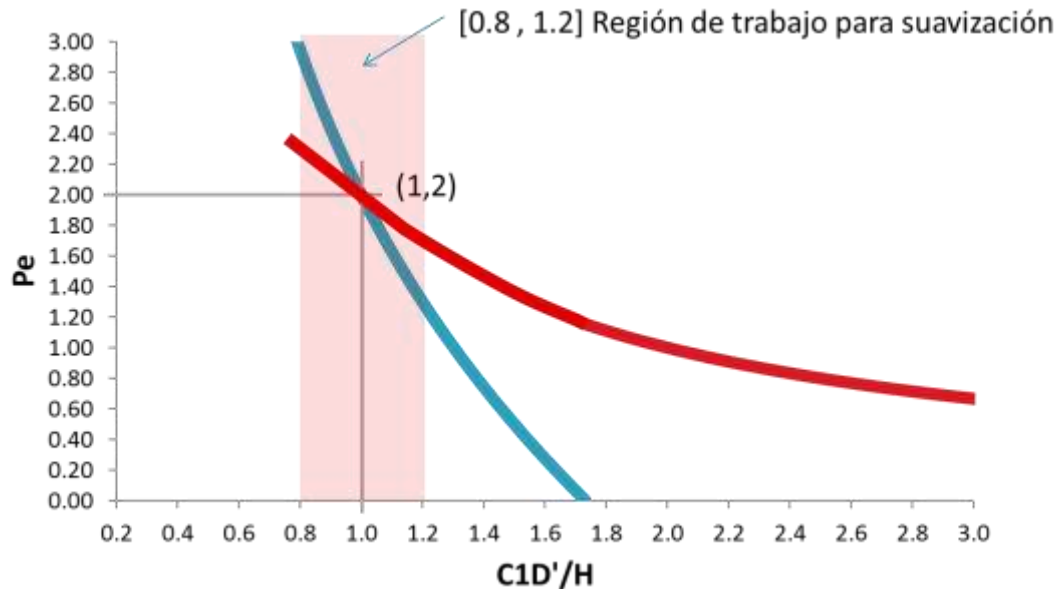


Figura 16. Visualización del dominio par suavización de las EDI.

3.3.1. Variables rígidas: Son las que toman valores numéricos exactos pero no constates; para nuestro caso son:

$$\circ C_1D'H = \left(\frac{C_1D'}{H} \right) \quad (20)$$

$$\circ C_1D'Hi = \left(\frac{C_1D'}{H} \right)^{-1} \quad (21)$$

- P_e = Pérdida específica al espesor

La razón principal por la que se está definiendo la variable CDH_i , que realmente es derivada de CDH , es porque Matlab maneja una estructura polinómica exclusiva para el sistema Sugeno y por lo tanto se hacía necesario crear una variable difusa virtual para representar la inversa de CDH .

3.3.2. **Variable Lingüística:** es aquella noción o concepto que vamos a calificar de forma difusa. Le aplicamos el adjetivo "lingüística" porque definiremos sus características mediante el lenguaje hablado, por ejemplo: alto, medio, bajo, etc. Cada variable rígida tendrá su equivalente variable lingüística, tal como se observa en la tabla 1.

Variable Rígida	Variable Lingüística
$C_1D'H$	CDH
$C_1D'Hi$	CDH_i
P_e	PCH

Tabla 1. Variables rígidas y su equivalente variable lingüísticas

En la figura 17 se puede observar el modelo de lógica difusa desarrollado en MATLAB usando las variables lingüísticas definidas y el sistema "Sugeno Pérdidas _1" aplicado.

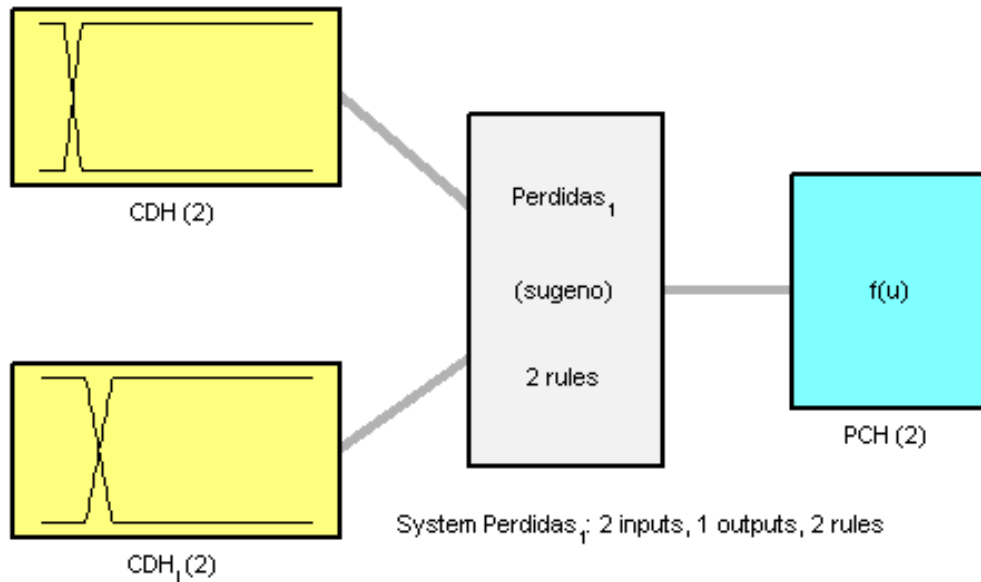


Figura 17. Modelo Sugeno suavización de Pe.

3.3.3. Universo de discurso: es el rango de valores que pueden tomar las variables rígidas que poseen la propiedad expresada por la variable lingüística. En el caso de C1D'H, para aceros entre 300 y 600 MPa y espesores entre 0.2 y 2.0 mm en una línea de galvanizado típica, este rango es de [0.23 6.53].

3.3.4. Función de pertenencia de variables de entrada: Definimos función de pertenencia como aquella aplicación que asocia a cada elemento de un conjunto difuso el grado con que pertenece al valor lingüístico asociado. Los conjuntos difusos son caracterizados por sus funciones de pertenencia y por lo tanto diremos que un conjunto es difuso cuando el concepto al que representa tiene una función de pertenencia difusa asociada a él.

Existen diferentes tipos estándar de FP, pero para el caso que nos ocupa la trapezoidal funciona apropiadamente, si el resultado requiere de mejora sustancial, se harán iteraciones con otros tipos de FP hasta encontrar una suavización adecuada. Los puntos para construir la FP trapezoidal resultan ser [0.23 0.8 1.2 6.53] y para CDH_i serían [0.15 0.83 1.25 4.35]

En las figuras 18 y 19 se muestran las relaciones de pertenencia de las variables lingüísticas para sus conjuntos difusos bajos y altos.

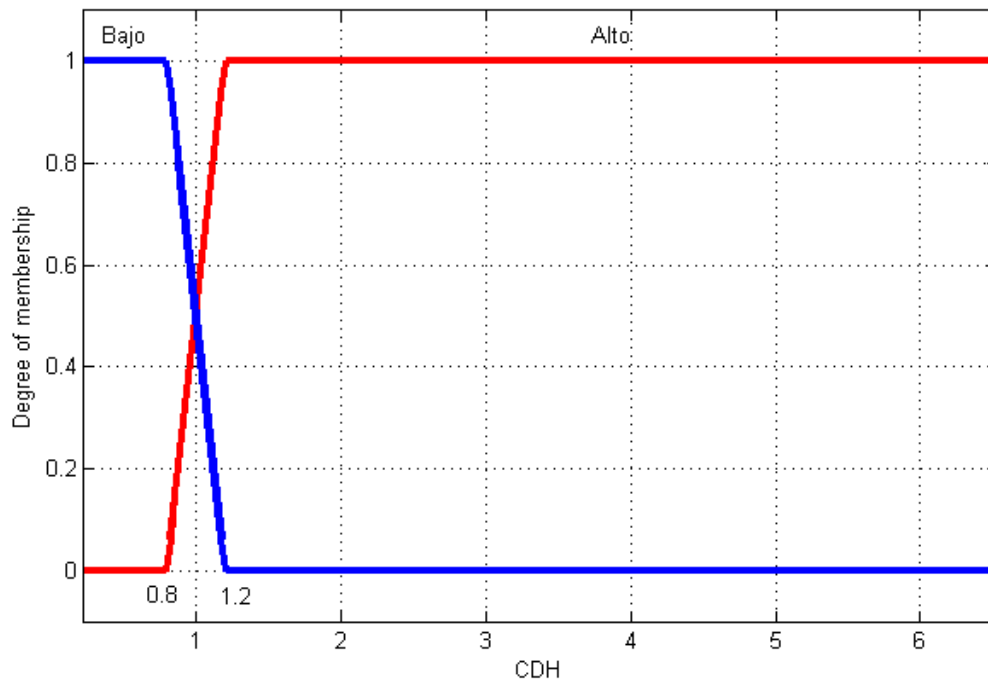


Figura 18. Funciones de pertenencia para CDH.

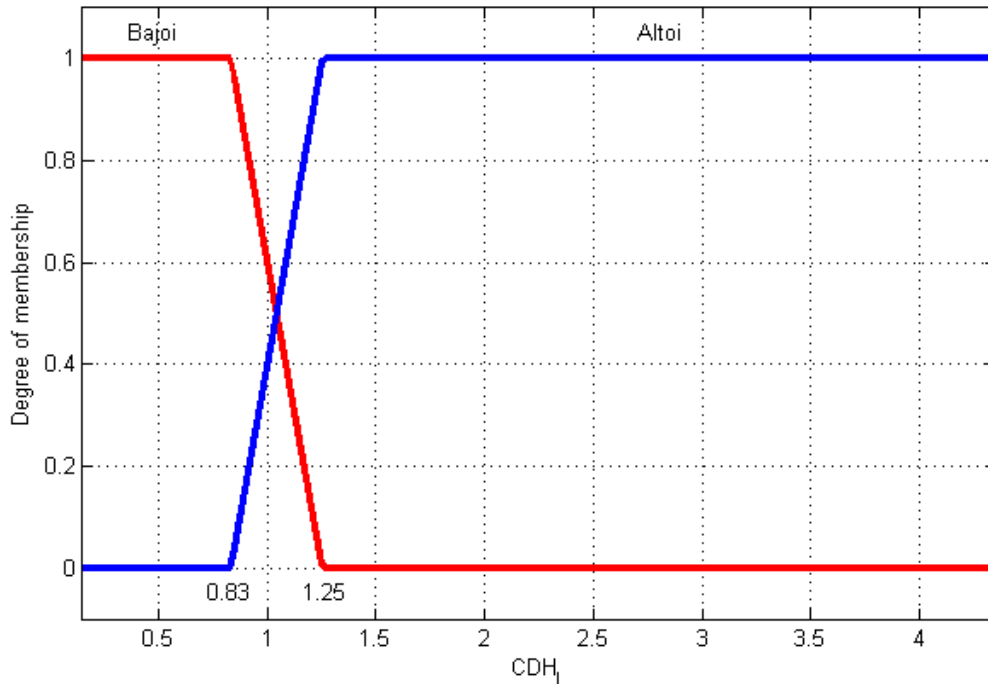


Figura 19. Función de pertenencia para CDH_i

3.3.5. Funciones de Salida para PCH: Por ser un sistema Sugeno, a diferencia del Mandami, las variables lingüísticas de salida no tienen funciones de pertenencia sino funciones que dependen del estado. Así, con la ecuación 16 (de Pe) y la definición de los parámetros anteriores, se puede escribir las funciones para la variable de salida, de la siguiente manera.

Cuando PCH es bajo:

$$\text{Bajo}P = -CDH + 3CDH_i \quad (22)$$

que corresponde a los parámetros [-1 3 0] en MATLAB y describe la primera parte de la ecuación (16).

Cuando PCH es alto:

$$\text{Alto}P = 2CDH_i \quad (23)$$

que corresponde a los parámetros [0 2 0] en MATLAB y describe la segunda parte de la ecuación (16).

3.3.6. **Reglas:** son las que relacionan las variables lingüísticas de entrada (para todos sus conjuntos difusos) con las funciones de salida. Las reglas para el sistema Sugeno Pérdidas_1 son:

$$\text{If } (CDH \text{ is Bajo}) \text{ and } (CDH_i \text{ is Alto}_i) \text{ then } (PCH \text{ is Bajo}P) \quad (24)$$

$$\text{If } (CDH \text{ is Alto}) \text{ and } (CDH_i \text{ is Bajo}_i) \text{ then } (PCH \text{ is Alto}P) \quad (25)$$

Al evaluar el modelo Sugeno Pérdidas_1 con las variables de entrada CDH y CDH_i para el universo de discurso [0.8 1.2], los valores de P_e que resultan están en el rango [1.67 2.95] y su gráfica se puede observar en la figura 20. En esta se muestran dos curvas, una en color azul que representa los datos obtenidos del Sugeno y otra en color magenta que se obtuvo haciendo uso de la herramienta de ajuste que tiene MATLAB (opciones de gráficas). Se encuentra que los valores obtenidos siguen un comportamiento cúbico, por lo tanto se planteará un modelo de regresión de tercer orden para encontrar la ecuación que estime los valores de las pérdidas específicas para el rango [0.8 1.2].

En la figura 21 se observa la gráfica de la ecuación total suavizada, usando las fórmulas de las ecuaciones (16) y los datos de salida del sistema Sugeno Pérdidas_1 para todo el universo de discurso de C₁D'H. Nótese que la suavización ha sido exitosa y que no es necesario ampliar el rango de análisis planteado en la sección 3.2.

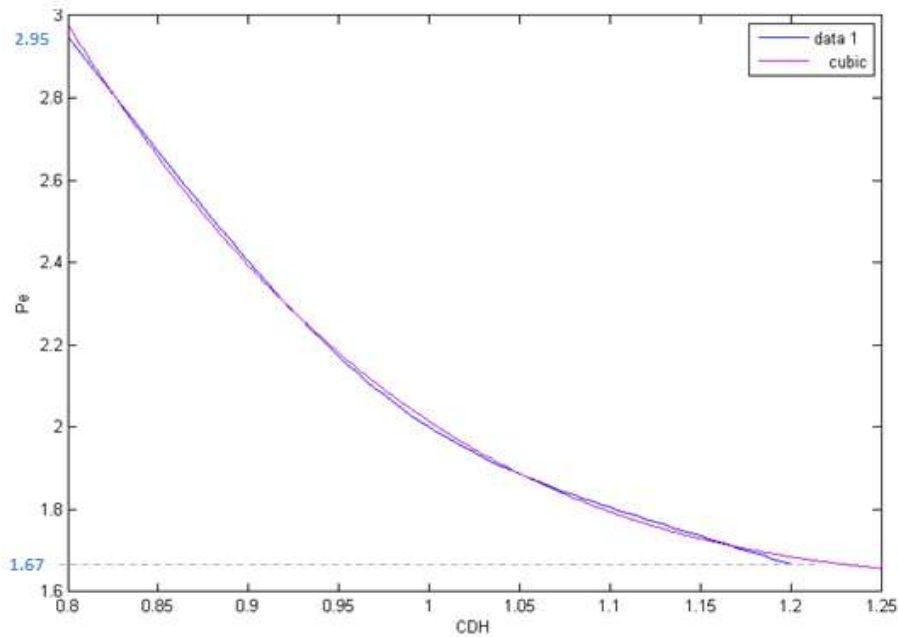


Figura 20. Salida del sistema Sugeno Perdidas_1 con curva de ajuste.

En la figura 22 se muestra una comparación gráfica de las ecuaciones antes y después de la suavización, en la zona difusa. La curva suavizada presenta un muy buen comportamiento, ya que está libre de discontinuidades y se conecta a las otras dos ecuaciones sin brusquedad.

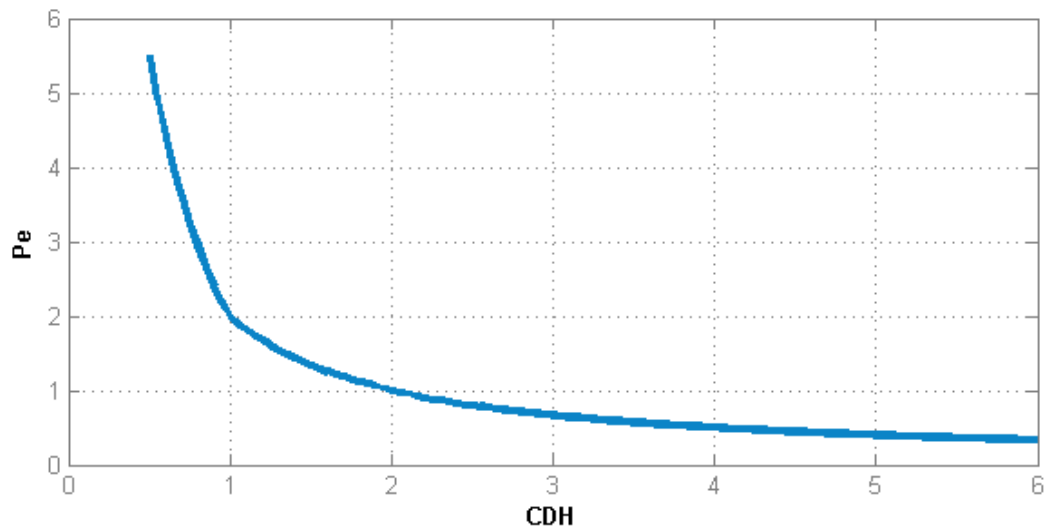


Figura 21. Grafica de los valores de salida del Modelo Sugeno Perdidas_1

Se procederá ahora a realizar la regresión con los datos de salida del Sugeno para ajustar la respuesta no lineal del sistema Sugeno y determinar una ecuación que estime las pérdidas específicas en la zona de transición.

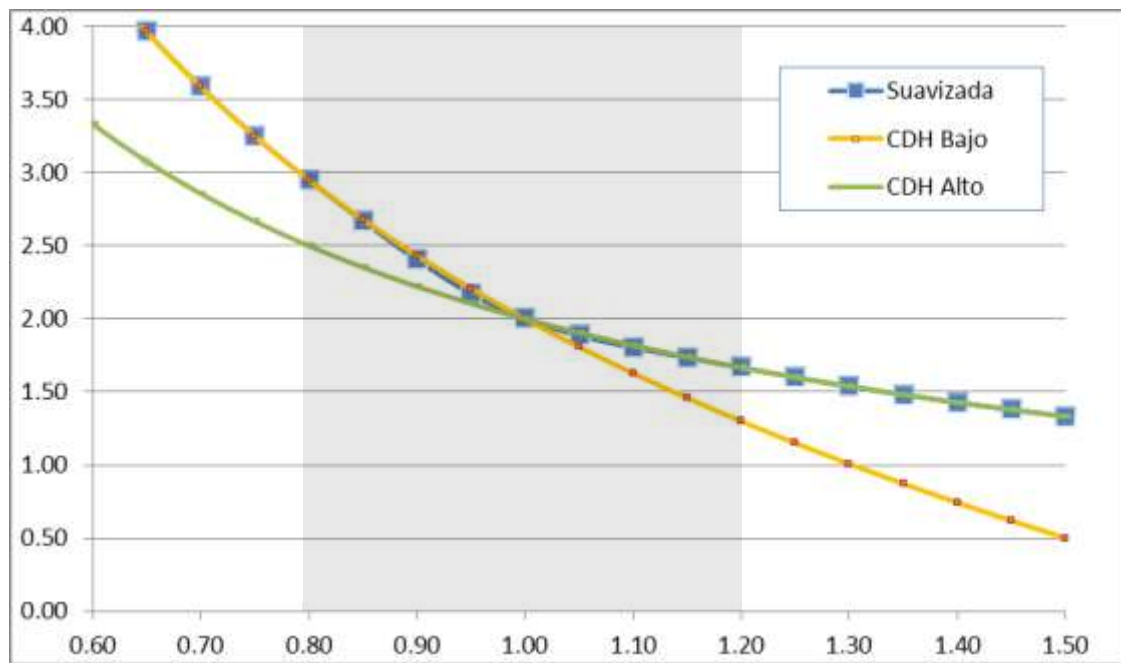


Figura 22. Comparación gráfica de ecuaciones antes y después de suavizar

3.4. Regresión de la Salida del Modelo Sugeno

Con el fin de simplificar los cálculos matemáticos es necesario expresar en fracciones los valores de frontera, por lo tanto $[0.8 \ 1.2] = \left[\frac{4}{5}, \frac{6}{5}\right]$

El modelo cúbico que se está planteando es:

$$y^t = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_1^2 + \beta_3 x_1^3 \quad (26)$$

Es necesario que la ecuación resultante de la regresión pase por los puntos de frontera del rango difuso, por lo tanto:

$$y^t\left(\frac{4}{5}\right) = \frac{3}{4} - \frac{4}{5} = \frac{15}{4} - \frac{4}{5} = \frac{75 - 16}{20}$$

$$y^t\left(\frac{4}{5}\right) = \frac{59}{20} \quad (27)$$

$$y^t\left(\frac{6}{5}\right) = \frac{2}{\frac{6}{5}} = \frac{10}{6} = \frac{5}{3} \quad (28)$$

Resolviendo y^t para las ecuaciones (27) y (28), tenemos:

a) Para $y^t \left(\frac{4}{5} \right)$

$$\frac{59}{20} = \beta_0 + \frac{4}{5}\beta_1 + \frac{16}{25}\beta_2 + \frac{64}{125}\beta_3$$

$$\beta_0 = \frac{59}{20} - \frac{4}{5}\beta_1 - \frac{16}{25}\beta_2 - \frac{64}{125}\beta_3 \quad (29)$$

Remplazando β_0 en y^t tenemos:

$$y^t = \frac{59}{20} - \frac{4}{5}\beta_1 - \frac{16}{25}\beta_2 - \frac{64}{125}\beta_3 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_1^2 + \beta_3 x_1^3$$

$$y^t = \frac{59}{20} + \left(x_1 - \frac{4}{5} \right) \beta_1 + \left(x_1^2 - \frac{16}{25} \right) \beta_2 + \left(x_1^3 - \frac{64}{125} \right) \beta_3 \quad (30)$$

Para simplificar la ecuación (30) hacemos los siguientes reemplazos:

$$z^t = y^t - \frac{59}{20} \quad (31)$$

$$x_1' = \left(x_1 - \frac{4}{5} \right) \quad (32)$$

$$x_2' = \left(x_1^2 - \frac{16}{25} \right) \quad (33)$$

$$x_3' = \left(x_1^3 - \frac{64}{125} \right) \quad (34)$$

Se simplifica entonces el modelo de la ecuación (30) a uno lineal de la siguiente forma:

$$z^t = \beta_1 x_1' + \beta_2 x_2' + \beta_3 x_3' \quad (35)$$

b) Para $y^t \left(\frac{6}{5} \right)$

Como $x_1 = \frac{6}{5}$, entonces, reemplazando este valor en las ecuaciones de la (31) hasta la (34), se obtiene:

$$x_1' = \frac{2}{5}$$

$$x_2' = \frac{36}{25} - \frac{16}{25} = \frac{4}{5}$$

$$x_3' = \frac{216}{125} - \frac{64}{125} = \frac{152}{125}$$

$$\text{Si } y^t = \frac{5}{3}$$

$$z^t = \frac{5}{3} - \frac{59}{20} = \frac{100 - 177}{60} = -\frac{77}{60}$$

$$-\frac{77}{60} = \frac{2}{5}\beta_1 + \frac{4}{5}\beta_2 + \frac{152}{125}\beta_3$$

$$\beta_1 = -\frac{77}{60} \times \frac{5}{2} - \frac{4}{5} \times \frac{5}{2}\beta_2 - \frac{152}{125} \times \frac{5}{2}\beta_3$$

$$\beta_1 = -\frac{77}{24} - 2\beta_2 - \frac{76}{25}\beta_3 \quad (36)$$

Remplazando β_1 en (35), se tiene:

$$z^t = -\left(\frac{77}{24} + 2\beta_2 + \frac{76}{25}\beta_3\right)x_1' + \beta_2x_2' + \beta_3x_3'$$

$$z^t = -\frac{77}{24}x_1' - 2\beta_2x_1' - \frac{76}{25}x_1'\beta_3 + \beta_2x_2' + \beta_3x_3'$$

$$z^t = -\frac{77}{24}x_1' + (x_2' - 2x_1')\beta_2 + (x_3' - \frac{76}{25}x_1')\beta_3$$

$$z^t + \frac{77}{24}x_1' = (-2x_1' + x_2')\beta_2 + (-\frac{76}{25}x_1' + x_3')\beta_3 \quad (37)$$

Con el fin de simplificar la ecuación (37), hagamos los siguientes reemplazos.

$$w = z^t + \frac{77}{24}x_1' \quad (38)$$

$$r_1 = (-2x_1' + x_2') \quad (39)$$

$$r_2 = \left(-\frac{76}{25}x_1' + x_3'\right) \quad (40)$$

Luego, reemplazando (38), (39) y (40) en (37), se obtiene:

$$w = r_1\beta_2 + r_2\beta_3 \quad (41)$$

Hay que hallar ahora β_2 y β_3 haciendo las transformaciones, para luego calcular β_0 y β_1 . Usando el modelo de regresión lineal del software Microsoft Excel, se obtiene que:

$$\beta_2 = 27.96 \text{ y,}$$

$$\beta_3 = -6.91.$$

Reemplazando estos valores en las ecuaciones (29) y (36), se obtiene que:

$$\beta_0 = 19.08$$

$$\beta_1 = -38.1$$

Y por lo tanto el modelo queda de la siguiente manera:

$$y^t = 19.08 - 38.1 x_1 + 27.96 x_1^2 - 6.91 x_1^3 \quad (42)$$

En la figura 23 se grafica esta ecuación; se puede observar que efectivamente la curva pasa por las coordenadas de los puntos de frontera.

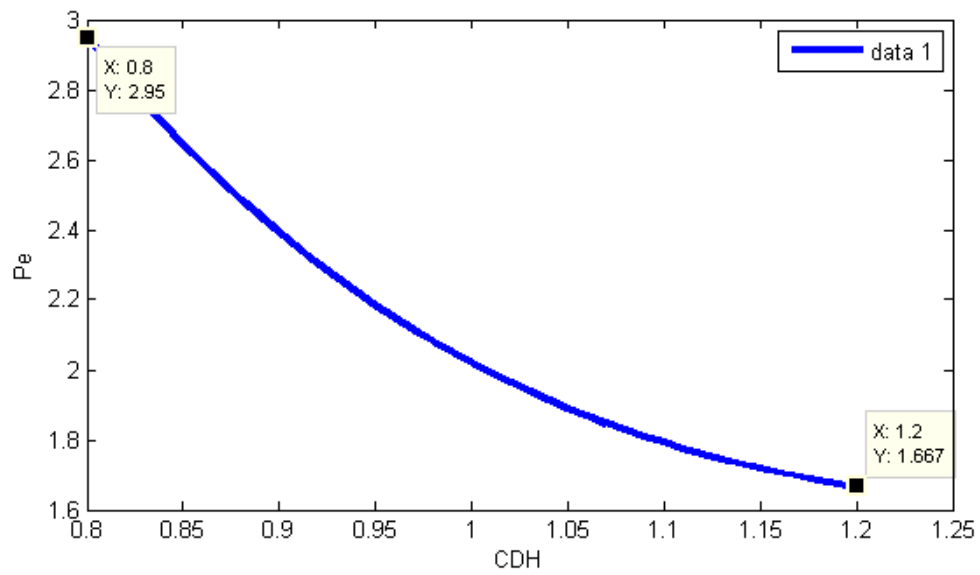


Figura 23. Gráfica de Pérdidas Específicas al espesor, ecuación suavizada

En la figura 24 se muestran las curvas de las EDI la de la ecuación suavizada (a la que en adelante llamaremos FUZZY) para todo el universo de discurso de C_1D'/H , teniendo en cuenta los siguientes datos:

- $D = 500 \text{ mm}$
- $T_f = 56 \text{ Kg/mm}^2$ Acero laminado en frío no recocido
- $E = 20,000 \text{ Kg/mm}^2$ Acero laminado en frío ASTM 1006
- $b = 1,000 \text{ mm}$
- $H =$ se varió entre 0.4 y 1.9 mm
- Ángulo de abrace: 90° (ángulo de abrace mínimo típicamente encontrado en líneas de proceso de acero plano, ver figura 2).

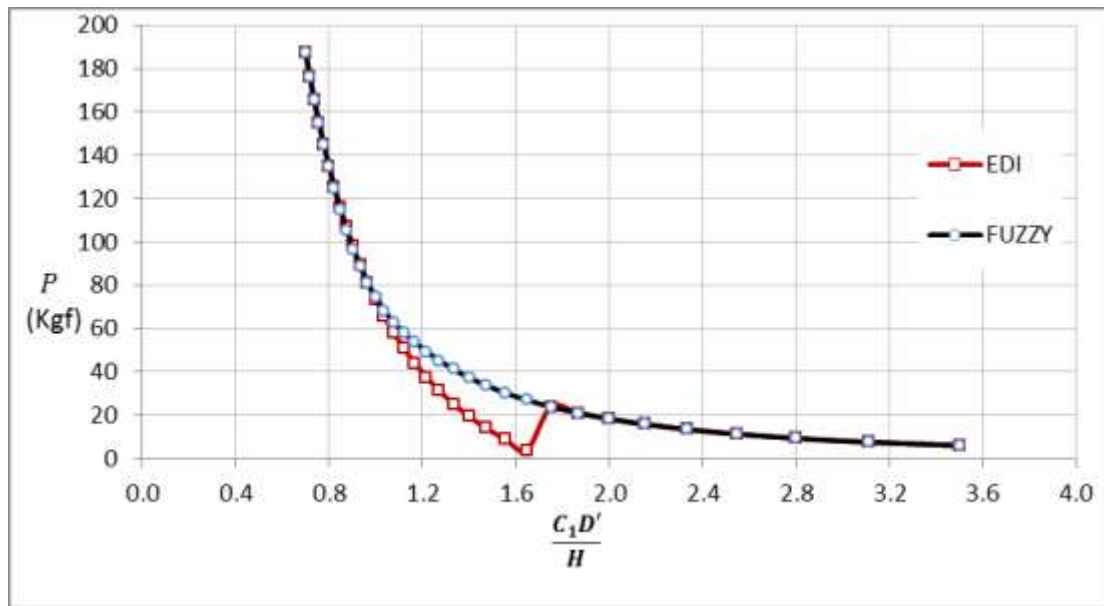


Figura 24. Grafica de comparación cálculo de pérdidas específicas (EDI vs FUZZY)

Se observa que para valores bajos de $\frac{c_1 D'}{H}$ las curvas que describen las pérdidas están superpuestas, sin embargo para valores de $\frac{c_1 D'}{H}$ entre 0.8 y 1.70 la curva que describe a las EDI se separa cumpliendo su discontinuidad, mientras que la FUZZY sigue una ruta continua y en búsqueda de acoplarse con la ecuación que aplica para los $\frac{c_1 D'}{H}$ altos. Lo anterior nos permite concluir que efecto de la suavización ha sido exitoso y que ahora las nuevas ecuaciones no presentan discontinuidad.

4. DESARROLLO EXPERIMENTAL DE ECUACIONES DE PÉRDIDAS

La experimentación es de importancia trascendental, por cuanto mediante ella se pueden utilizar mecanismos que posibiliten estudiar un fenómeno, variar condiciones y llegar a conclusiones objetivas a través del análisis estadístico. En el contexto de esta tesis, la experimentación se utilizará para analizar el comportamiento de las pérdidas por dobleces bajo los factores comunes presentes en la industria del acero plano y concluir con el diseño de una ecuación que las permita estimar confiablemente.

4.1. Justificación del abordaje experimental

Tal como se ha mencionado, existen pocas ecuaciones disponibles para el cálculo de pérdidas por dobleces y las que existen cuentan con los problemas ampliamente descritos en el capítulo 2 de esta investigación. Se ha llegado a una mejora ostensible en el capítulo 3, con la obtención de una ecuación suavizada y continua en todos los rangos de las variables de entrada, sin embargo, se quiere aportar literatura y conocimiento a través de una ecuación, generada en un contexto imparcial y con la objetividad que ofrece la experimentación.

Se tendrán en cuenta las variables que más afectan a nuestra respuesta (pérdidas por dobleces) para los procesos productivos descritos en el capítulo 2.

4.2. Definición de las variables

De acuerdo con lo expuesto en los capítulos anteriores y por experiencia y del autor, las cinco variables a considerar en el experimento son: Diámetro del rodillo, ángulo de abrace, espesor de lámina, ancho de lamina y la dureza (HRB) que se usará como reemplazo del esfuerzo de fluencia (S_y). En la tabla 2 se muestran los factores seleccionados y sus respectivos rangos, que aplican para una línea de galvanizado de ACESCO S.A.S, empresa que facilitó sus instalaciones y productos para la experimentación.

	Factor	Unidad	Mínimo	Máximo
1	Diámetro de rodillo	Mm	400	800
2	Angulo de abrace	°	10	90
3	Espesor de la lámina	Mm	0.6	1.90
4	Ancho de la lámina	Mm	50	150
5	Dureza	HRB	55	90

Tabla 2. Variables que afectan las pérdidas por dobleces

En esta línea de proceso se encuentran instalados rodillos con diámetros menores que 400 mm, sin embargo normalmente carecen de muy poco abrace y no participan continuamente en el proceso, ya que forman parte de equipos que actúan solo en los cambios de bobina en las secciones de entrada y salida. En el caso del ángulo de abrace sobre los rodillos, el valor máximo se tomará de 90° , ya que como lo define la ecuación de pérdidas EDI, por encima de 45° el ángulo de abrace no representa mayor variación en la respuesta.

Se incluirán solo los espesores considerados “gruesos” [0.60 1.90] por ser los generadores de las pérdidas más significativas y que seguro ofrecerán una mejor resolución en la medida. El ancho de lámina, que para el caso de la línea de galvanizado de ACESCO se usa entre 914 y 1,220 mm, se utilizará en el experimento con el rango mostrado en la tabla 2, esto para no sobredimensionar el banco de pruebas o prototipo y poder manipular fácilmente las muestras.

Los valores de dureza requeridos también son accesibles, sin embargo puede haber combinaciones de espesor y dureza no disponibles. Las pruebas serán llevadas a cabo utilizando un durómetro (Wilson Rockwell). Para los valores más altos de dureza se realizara un perfil de dureza en todo a través del ancho de la lámina (914, 1000 y 1220 mm), debido a que los valores de dureza no son homogéneos en el ancho pero si en el largo de esta.

La variable de respuesta, que ya fue ampliamente descrita en el capítulo 1, es la Pérdida por doblez, cuando un acero plano abraza un rodillo no motorizado. Es importante comentar que en un entorno industrial se vuelve muy complicado y oneroso realizar esta experimentación en las líneas de proceso, ya que esto involucra cambio de condiciones de operación, paradas de línea, generación de material no conforme y el consumo de tiempo disponible para las corridas experimentales. Es por esto que en esta investigación se construyó un banco de pruebas en el que se pueden realizar ensayos sin afectar para nada la línea de producción.

4.3. Diseño y construcción de un banco de ensayos de doblez

De manera conceptual el banco de ensayos contará con un cuarto ($1/4$) de cilindro para simular el rodillo sobre el que se abrazará la lámina. Se escogieron tres sectores con diámetros de 400, 600 y 800 mm, con el fin de no perder la oportunidad de capturar no linealidades en la estructura de la ecuación resultante del experimento. Los tres tramos de cilindros (400, 600 y 800 mm de diámetro)

irán ensamblados en un solo cuerpo y a su vez pivotados en el eje del cilindro. De esta manera al girar sobre el cuerpo de rodillos, se podrá variar el ángulo de abrace entre 10 y 90° (ver figura 25). La probeta de lámina abrazará el tramo de rodillo que se esté evaluando y se fijará en un extremo a pesos conocidos y en el otro a una celda de carga con el fin de calcular la pérdida por el doblez, a través de la diferencia entre la lectura de la celda de carga y los pesos añadidos. En secciones posteriores se explicara con detalle la operación de este banco de ensayos.

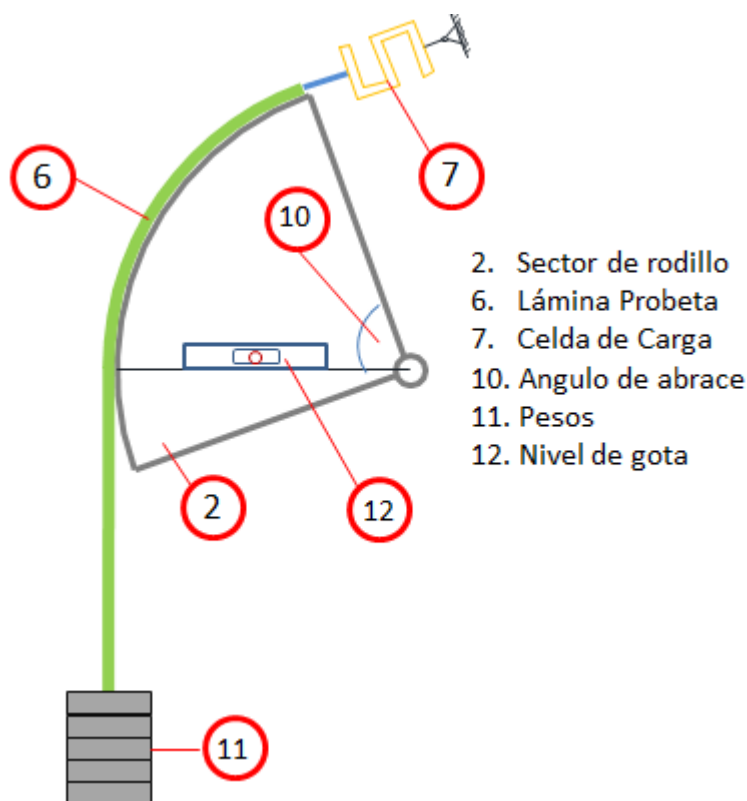


Figura 25. Diagrama de operación del Prototipo.

En las figuras 26 y 27 se muestra el diseño detallado en 3D, el cual consta de un total de 5 arcos (tres fijos y dos desmontables) con una longitud de un cuarto de circunferencia, que puede rotar un máximo de 90° a través del sistema variador (3) del ángulo de abrace. Los sectores de rodillo tienen la posibilidad de desplazarse axialmente, a través del sistema de centrado (5), con el fin de centrar la muestra con respecto a la celda de carga. Igualmente cuenta con abrazaderas para sujeción de la muestra en ambos extremos, un dispositivo (9) que garantiza la tangencia de la muestra al inicio del rodillo y todo está soportado sobre una estructura soldada fabricada con perfiles de acero en C.

Con base en los planos de construcción se fabricó el banco de Pruebas en las instalaciones de ACESCO S.A.S utilizando materiales existentes y sobrantes de montajes anteriores. Toda la estructura y el cuerpo de los cilindros se fabricaron en acero estructural A36 soldado con arco eléctrico. Las partes maquinadas como los tornillos de potencia, ejes, mordazas y piezas auxiliares se mecanizaron en el taller de máquinas herramientas de ACESCO S.A.S.

El sistema de medición de fuerza consta de una celda de carga con capacidad de 500 Kg marca AUTOPESO y un indicador de peso con resolución de hasta dos dígitos marca AUTOPESO. Ver fotos 5 y 6. Según instrucciones del fabricante de la pantalla de visualización y la celda de carga, el indicador se calibró con un peso conocido y con la celda en la posición en la cual se tomarán las mediciones, para esto se hizo el montaje en el Prototipo, usando cuerda de piano de 0.5 mm en reemplazo de la lámina probeta, con el fin de que las pérdidas fueran despreciables y la lectura fuese lo más cercana a la realidad y representara el peso conocido.

En cuanto a la medición del ángulo se utilizó un nivel industrial de gota que se soportaba sobre unos perfiles en L unidos al cuerpo del Rodillo de 800 mm. Ver figura 25 y foto 7.



Foto 1. Pantalla de visualización de carga.



Foto 2. Celda de carga capacidad 500 Kg.



Foto 3. Nivel industrial de gota.

Todo el proceso de corte, preparación, maquinado, ensamble e instalación tomó 8 semanas y su costo total aproximado fue de US \$ 4,000 incluyendo la mano de

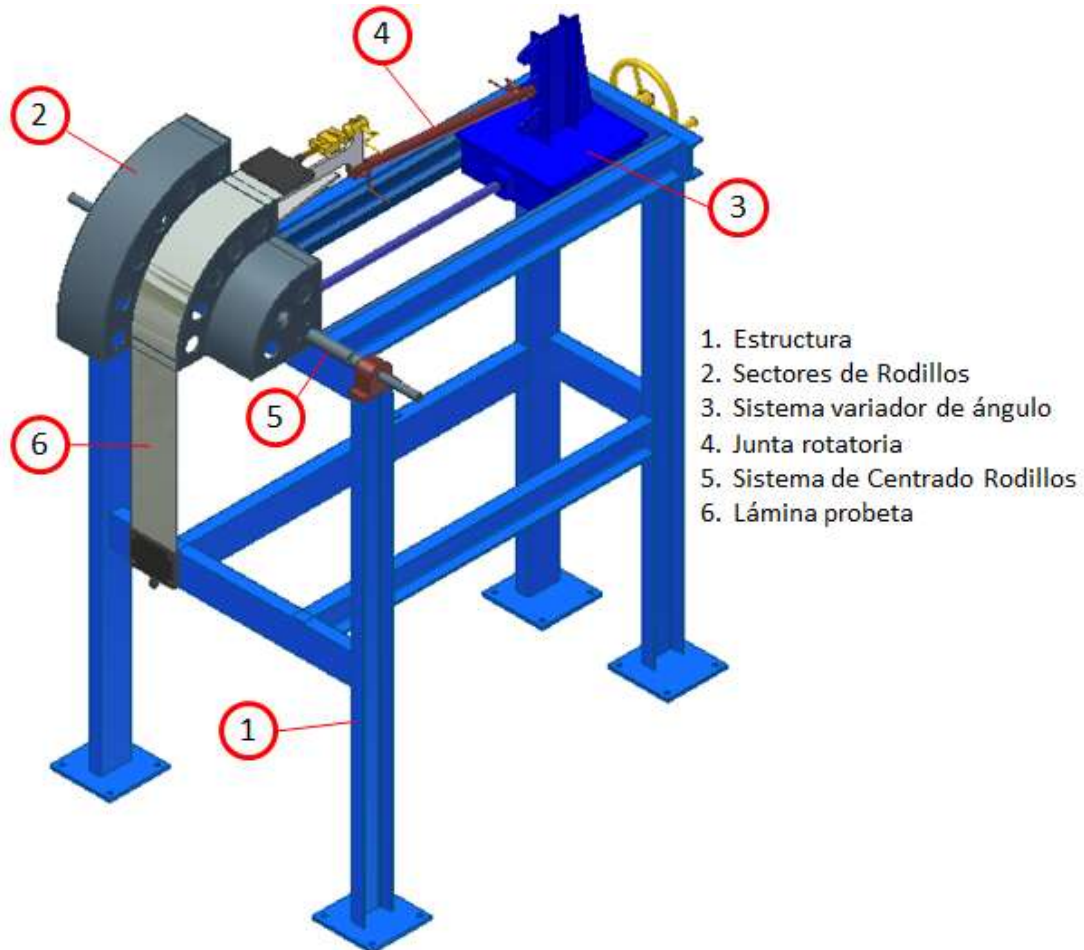


Figura 26. Diseño de Prototipo, vista general en 3D

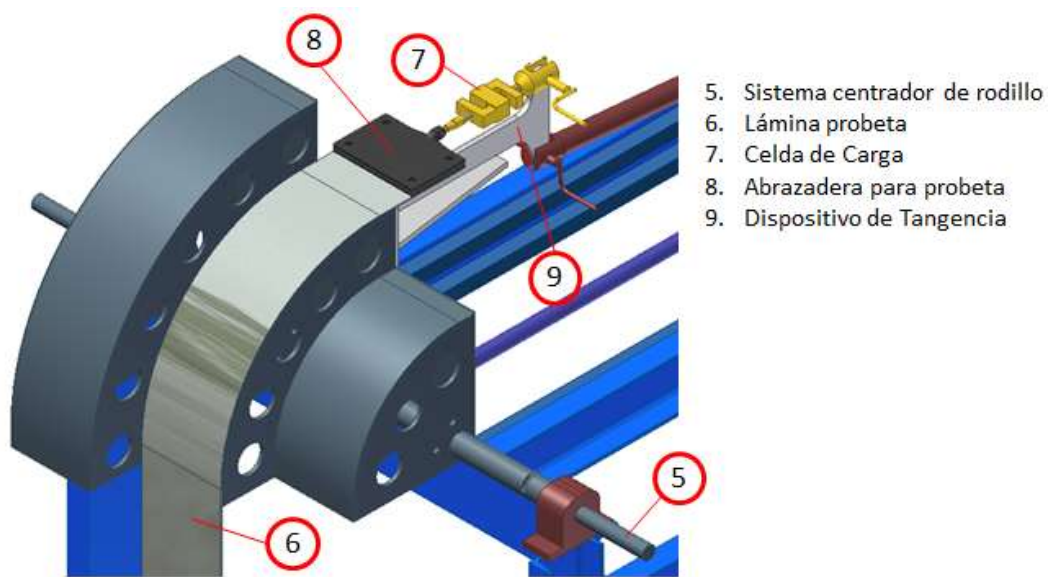


Figura 27. Diseño de Prototipo: Vista con acercamiento al sistema principal
 Obra, materiales, herramientas y el sistema de medición. En las fotos # 1, 2, 3 y 4 se puede observar el banco de pruebas construido y ubicado en las instalaciones de ACESCO S.A.S.



Foto 4. Vista general del Prototipo



Foto 5. Vista general posterior del Prototipo

4.4. Descripción de la Operación de Banco de Ensayos.

Previa preparación y fabricación de cada probeta (6), se ajusta el ángulo de abrace con el sistema variador de ángulo (3) y se centra el sector del rodillo que se desea colocar, a través del sistema centrador de rodillo (5). Este último cuenta con eje con rosca de potencia y en el eje de los rodillos se colocaron tuercas soldadas en las caras laterales de los sectores. Con esto al mover el eje principal del centrador, todos los sectores de rodillo se desplazan hasta encontrar el centro imaginario de la celda de carga.



Foto 6. Detalle del dispositivo de tangencia



Foto 7. Detalle del sistema centrador de Rodillo

Se procede luego a la fijación de la probeta con las abrazaderas (8), una en cada extremo. Se ensambla uno de los extremos a la celda de carga (7) y ésta al dispositivo de tangencia (9), que es solidario con el sistema variador de ángulo (2). El dispositivo de Tangencia (9) es el que garantiza que la probeta entre tangente al inicio del ángulo de abrace en el rodillo y evita que se generen pérdida por doblez por fuera del rodillo.

La adición de los pesos (11) al extremo de la probeta se suspende hasta que la lámina abrace 100% en el sector resultante del ajuste de ángulo (ver figura # 25). Una vez logrado esto, se procede a registrar la medida de tensión que se muestra en la pantalla indicadora y el peso total añadido en el otro extremo de la probeta. La diferencia en estos dos valores es precisamente la pérdida por tensión de esa probeta con el ángulo de abrace ajustado.

Una vez fabricado y probado el banco de pruebas se debe abordar la siguiente fase que involucra la selección de un diseño de experimento apropiado y a su vez razonablemente económico en cuanto al número de corridas y acero a tomar de la línea de galvanizado.

4.5. Diseño Experimental

Se evaluó la posibilidad de seleccionar un diseño factorial 2^k completo, pero este diseño es apropiado para la estimación de los efectos, tanto de primer orden como las interacciones entre estos, sin embargo, falla cuando existe efectos adicionales que son significativos (segundo y tercer orden), que por lo obtenido en el capítulo

3, es lo que se espera en esta investigación. Un diseño 3^k con dos réplicas representaría 486 corridas experimentales, lo que resultaría impráctico y costoso.

Agotadas las opciones del diseño factorial, se analizaron diseños de superficie de respuesta (RSM) que son apropiadas para varios factores significativos. Dentro de los modelos disponibles se ha escogido el diseño Draper-Lin que es el más oportuno cuando el número de variables a estudiar es elevado y se quiere evaluar más de dos niveles de cada factor. Este diseño permite conseguir la máxima información posible con el menor número de corridas experimentales, es por esto que este modelo cae dentro de los llamados "diseños compuestos reducidos"⁵.

El diseño del experimento se realizó con la ayuda del software estadístico Statgraphics y en la figura 28 se muestran los atributos de la superficie de respuesta. Se aleatorizó el orden de las corridas y los resultados obtenidos usando el banco de ensayos se muestran en la siguiente sección.

4.6. Ejecución del Experimento.

Las muestras se obtuvieron de la línea de galvanización en continuo de la empresa Acerías de Colombia ACESCO S.A.S, la cual como se dijo anteriormente, usa como materia prima bobinas de acero laminados en frío, pero el producto al final del proceso es recocido en línea y tiene menor dureza, por lo tanto dependiendo de la dureza se utilizaran muestras de rollos laminados en frío o galvanizados. Para medir la dureza del acero base en las muestras galvanizadas, es necesario eliminar la capa de zinc., que por lo general tiene un espesor entre 0.03 y 0.04 mm, siendo necesario introducir las muestras en una solución de ácido clorhídrico (HCL) al 33%.

⁵ N. R Draper, D.K.J Lin, *Technometrics* 32 (1990) 173 Draper, N. R. and Lin, D. K. J. (1990), "Small Response Surface Designs," *Technometrics*, 32, 187--194

Atributos de la Superficie de Respuesta

Clase de diseño: Superficie de Respuesta

Nombre del Diseño: Compuesto reducido de Draper-y-Lin

Características del diseño: Rotable y ortogonal

Nombre del archivo: Perdidas.sfx

Diseño Base

Número de factores experimentales: 5

Número de bloques: 2

Número de respuestas: 1

Número de corridas: 60, incluyendo 8 puntos centrales por bloque

Grados de libertad para el error: 38

Aleatorizar: Si

<i>Factores</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Unidades</i>	<i>Continuo</i>
Diametro	400	800	mm	Si
Angulo	29	72	°	Si
Ancho	60	120	mm	Si
Espesor	0.86	1.46	mm	Si
Dureza	72	88	HRB	Si

<i>Respuestas</i>	<i>Unidades</i>
Perdidas	Kgf

Figura 28: Atributos de Diseño del experimento, tomado de StatGraphics

En el proceso de recocido en línea, es normal que la dureza no sea homogénea a lo ancho de la cinta, ya que por la proximidad de los bordes de la lámina a los quemadores de fuego directo del horno, estos tienden a quedar un poco más blandos que en el centro. Esto fue de gran ventaja para la toma de muestras, ya que se pudieron conseguir la mayoría de las combinaciones de espesor y dureza requeridas por el diseño del experimento. En la figura # 29 se observa el perfil de dureza para una lámina de 1,200 x 1.16 mm de acero laminado en frío, recocido en línea y decapado manualmente, donde se puede apreciar la gran variación de durezas en una cinta de 1,220 mm recocida en línea.

Con el fin de conservar un ancho parejo y un corte a escuadra y libre de rebabas en las muestras, se utilizó una cizalla industrial como la mostrada en la foto 8.

Basado en las especificaciones anteriores se ejecutó el experimento y los resultados se presentan en la tabla de datos del anexo 2. De las 60 muestras necesarias para realizar las corridas experimentales del diseño, no fue posible conseguir 6 combinaciones de espesor y dureza, por lo tanto se hace necesario realizar una estimación de la variable de respuesta para estas condiciones experimentales.

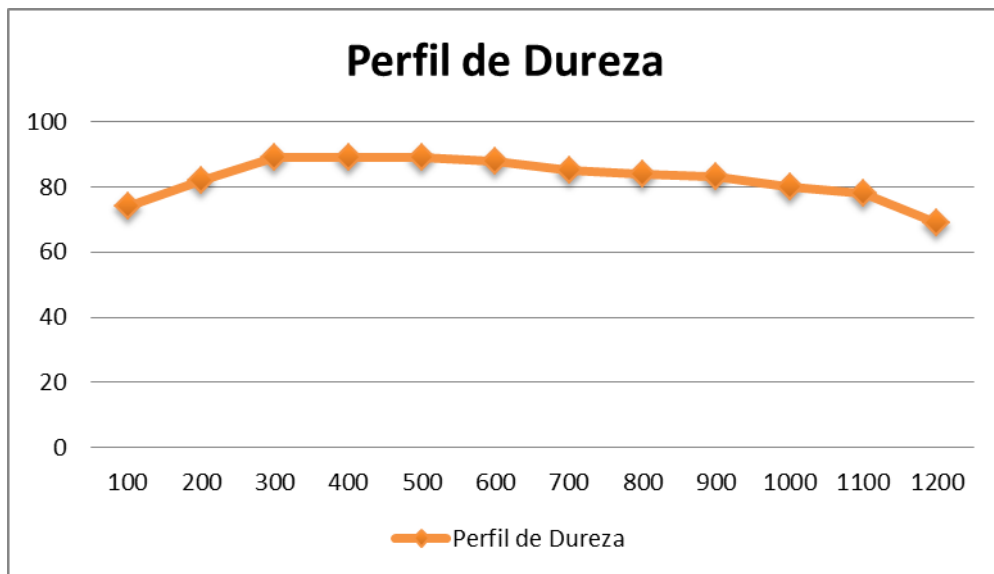


Figura 29. Perfil de dureza para lámina de 1.16 mm de espesor y 1,200 mm de ancho.



Foto 8. Cizalla manual para corte de Muestras

Estimación de datos faltantes

Con el fin de simplificar la escritura del modelo de regresión, se realizan las siguientes equivalencias o reemplazos:

$X_1 = \text{Diámetro del rodillo}$

$X_2 = \text{Angulo de Abrace}$

$X_3 = \text{Ancho de la lámina}$

$X_4 = \text{Espesor de la lámina}$

$X_5 = \text{Dureza}$

Se plantea el modelo de regresión lineal que se considera apropiada y suficiente para estimar los datos faltantes. El modelo es el siguiente:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_5 x_5$$

Para la estimación de estos datos, es preciso revisar primero los coeficientes de Pearson mostrados en la tabla # 3. Se comprueba que no existe alta correlación entre los factores, lo que hace apropiados los datos para poder estimar los datos.

r_{ij}	X1	X2	X3	X4	X5	Y
X1	1.000					
X2	0.000	1.000				
X3	0.000	0.000	1.000			
X4	0.000	0.000	0.000	1.000		
X5	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	
Y	-0.195	0.639	0.286	0.462	0.036	1.000

Tabla 3. Coeficientes de correlación para los 54 datos.

Después de correr el modelo de regresión lineal con los 54 datos experimentales, se obtuvieron los resultados estadísticos presentados en las tablas 4, 5 y 6. Hay que resaltar que en la primera corrida del modelo se encontró que X_5 no es significativo, por eso los datos mostrados fueron calculados sin este factor para ganar grados de libertad en el error.

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coef Correlacion	0.861
R ²	0.742
R ² ajustado	0.721
Error típico	0.724
Observaciones	54

Tabla 4. Estadística de la regresión para estimación de datos faltantes.

ANÁLISIS DE VARIANZA					
SoV	dof	SS	MS	Fo	P-value
Regresión	4	73.922	18.481	35.252	7.29039E-14
Residuos	49	25.688	0.524		
Total	53	99.610			

Tabla 5. ANOVA regresión para estimación de datos faltantes.

	Beta	Error típico
Intercepción	-2.767	0.808
X1	-0.002	0.001
X2	0.048	0.005
X3	0.015	0.004
X4	2.775	0.436

Tabla 6. Resumen de coeficientes de regresión y error típico.

La ecuación que estima las pérdidas para las condiciones experimentales faltantes, resulta en:

$$y = -2.8 - 0.002x_1 + 0.048x_2 + 0.015x_3 + 2.78x_4$$

Los datos estimados con el modelo de regresión se muestran en la tabla 7.

Condición experimental	Diámetro (mm)	Angulo (°)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Dureza (HRB)	Pérdida (Kgf)
2	228	50	90.0	0.60	80	3.81
7	972	50	90.0	1.16	80	2.33
30	600	50	90.0	1.72	80	4.62
32	228	50	90.0	1.16	80	3.81
37	972	50	90.0	1.16	80	2.33
60	600	50	90.0	1.72	80	4.62

Tabla 7. Datos faltantes estimados a partir de los otros datos experimentales

Después de concluida la etapa de experimental, se procederá a utilizar herramientas estadísticas como los modelos de regresión, que permiten establecer una relación matemática entre un conjunto de variables y una respuesta (ecuación).

4.7. Modelos de regresión para datos experimentales

Con el fin de simplificar la escritura de los modelos de regresión se realizan las siguientes equivalencias o reemplazos:

X_1 = Diámetro del rodillo

X_2 = Angulo de Abrace

X_3 = Ancho de la lámina

$X_4 = \text{Espesor de la lámina}$

$X_5 = \text{Dureza}$

Se formulan los siguientes modelos de regresión:

Modelo Lineal:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_5 x_5 \quad (43)$$

Modelo cuadrático:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_2 x_2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_3 x_3 + \beta_{33} x_3^2 + \beta_4 x_4 + \beta_{44} x_4^2 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{34} x_3 x_4 + \beta_5 x_5 + \beta_{55} x_5^2 \quad (44)$$

Modelo Multiplicativo de Potencias

$$y = \beta_0 x_1^{\beta_1} x_2^{\beta_2} x_3^{\beta_3} x_4^{\beta_4} x_5^{\beta_5} \quad (45)$$

Esta ecuación se puede expresar en Logaritmos Naturales de la siguiente manera:

$$\ln y = \ln \beta_0 + \beta_1 \ln x_1 + \beta_2 \ln x_2 + \beta_3 \ln x_3 + \beta_4 \ln x_4 + \beta_5 \ln x_5 \quad (46)$$

Modelo de potencias acondicionado

$$y = \beta_0 \left(\frac{x_1 x_2}{x_4} \right)^{\beta_1} x_3^{\beta_2} x_5^{\beta_3} \quad (47)$$

Este modelo es una alternativa al de potencias, pero intentando conservar la estructura de nuestra variable $C_1 D'/H$.

La ecuación (47) Expresada en logaritmos naturales, queda de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \ln y^t &= \ln \beta_0 + \beta_1 \ln \left(\frac{x_1 x_2}{x_4} \right) + \beta_2 \ln x_3 + \beta_3 \ln x_5 \\ \ln y^t &= \ln \beta_0 + \beta_1 (\ln x_1 + \ln x_2 - \ln x_4) + \beta_2 \ln x_3 + \beta_3 \ln x_5 \end{aligned} \quad (48)$$

Ahora si se hace:

$$z = \ln y \quad (49)$$

$$r = \ln \beta_0 \quad (50)$$

$$s = \ln x_1 + \ln x_2 - \ln x_4 \quad (51)$$

$$t = \ln x_3 \quad (52)$$

$$u = \ln x_5 \quad (53)$$

Entonces, la ecuación (48) se re-escribe de la siguiente manera:

$$z = r + \beta_1 s + \beta_2 t + \beta_3 u \quad (54)$$

Se desarrollaron todos estos modelos y la comparación de los análisis de varianza obtenidos se muestra en la tabla 8.

Tipos de Modelo	Fo	R² ajustado	SSE
Lineal	34	0.74	26
Cuadrático	15	0.74	22
Multiplicativo de Potencias	64	0.81	3
Ecuación 4	3	0.08	17

Tabla 8. Cuadro comparativo de ANOVA's para modelos.

El modelo multiplicativo de potencias es el que mejor predice la respuesta de pérdidas por dobles al tener los mejores parámetros estadísticos, es decir, mejor estadístico de prueba F, mayor R cuadrado ajustado y la menor suma de cuadrados del error. Por lo tanto solo se mostrarán los datos estadísticos obtenidos de este modelo.

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.91
Coeficiente de determinación R ²	0.82
R ² ajustado	0.81
Error típico	0.25
Observaciones	60

Tabla 9. Valores estadísticos modelo multiplicativo de Potencias

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>P-Value</i>
Regresión	4	15.35	3.84	63.7	5.3 E-20
Error	55	3.31	0.06		
Total	59	18.67			

Tabla 10. ANOVA modelo multiplicativo de Potencias

	<i>Coeficientes</i>	<i>Error típico</i>
Intercepción	-2.48	0.89
ln X1	-0.42	0.11
ln X2	0.83	0.08
ln X3	0.63	0.11
ln X4	1.34	0.15

Tabla 11. Coeficientes del modelo multiplicativo de Potencias.

El modelo de regresión planteado es:

$$y^t = \beta_0 x_1^{\beta_1} x_2^{\beta_2} x_3^{\beta_3} x_4^{\beta_4} x_5^{\beta_5}$$

De donde se sabe que $\ln \beta_0 = -2.48$ por lo tanto $\beta_0 = 0.084$. Con esto, la ecuación resultante, que en adelante llamaremos DOE, se puede escribir de la siguiente manera:

$$y^t = 0.084 x_1^{-0.42} x_2^{0.83} x_3^{0.63} x_4^{1.34} \quad (55)$$

De acuerdo con las condiciones experimentales, la ecuación anterior fue desarrollada para valores de $\frac{C1D'}{H}$ entre 0.55 y 5.21, por lo tanto las comparaciones que se hagan con la ecuación suavizada tendrán validez.

En la figura 30 se muestra la comparación de las curvas que resultan de las ecuaciones EDI, las obtenidas con la suavización y las desarrolladas por experimentación. Se han tenido en cuenta los mismos datos de la figura 24, los cuales se repiten a continuación para facilidad del lector:

- D = 500 mm
- T_f = 56 Kgf/mm² Acero laminado en frío no recocido
- E = 20,000 Kgf/mm² Acero laminado en frío ASTM 1006
- b = 1,000 mm
- H = se varió entre 0.4 y 1.9 mm

- Ángulo de abrace: 90° (ángulo de abrace mínimo típicamente encontrado en líneas de proceso de acero plano, ver figura 2).

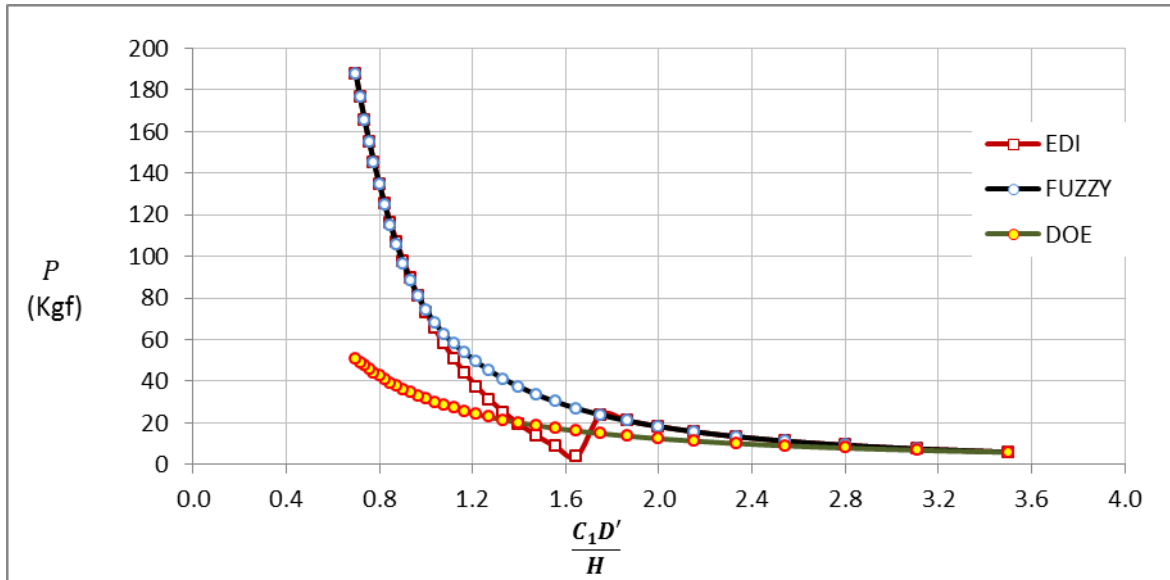


Figura 30. Comparación curvas ecuaciones EDI, FUZZY y DOE

Ya en el capítulo 3 se compararon las curvas de las ecuaciones EDI y FUZZY, así que en esta sección solo se comentará comparativamente los comportamientos de la FUZZY y la DOE. El aspecto más importante a resaltar es que para valores pequeños de $\frac{C_1 D'}{H}$, las pérdidas estimadas por la DOE son menores que las que estima FUZZY, sin embargo esta diferencia (que inicia en 3.8 veces) se va reduciendo a medida que aumenta $\frac{C_1 D'}{H}$, hasta llegar a ser casi nula a partir de valores de $\frac{C_1 D'}{H} = 2.8$. En el siguiente capítulo se plantearán unas posibles causas para este comportamiento.

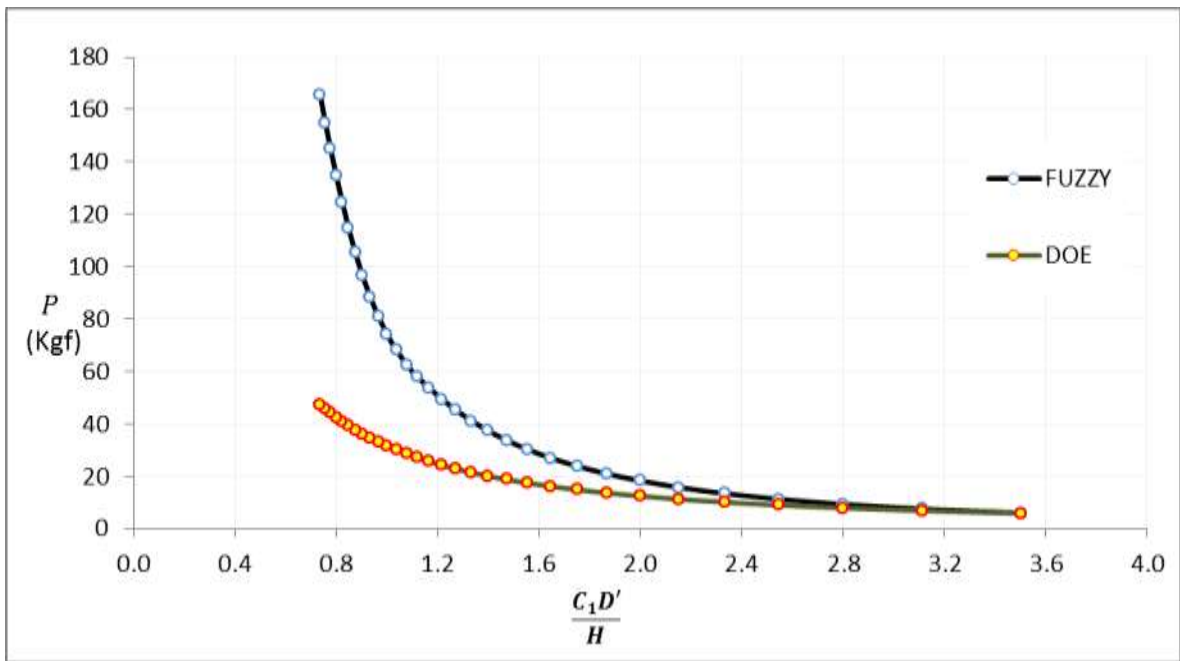


Figura 31. Comparación curvas ecuaciones FUZZY y DOE

5. REFLEXIONES Y CONCLUSIONES

El desarrollo de esta investigación proporciona unas herramientas de cálculo para estimar las pérdidas de energía en la industria del acero por concepto de dobleces de lámina en procesos continuos, ya sea usando las EDI suavizadas (FUZZY) o la obtenida por experimentación (DOE). A continuación se plantean unas reflexiones de los resultados observados y algunas comparaciones útiles entre las ecuaciones anteriores y las obtenidas durante el desarrollo de este trabajo, con el fin de que los usuarios finales tengan bases teóricas para tomar una decisión sobre la aplicabilidad de cada una.

5.1. Dureza, factor no significativo

Una de las grandes sorpresas en los resultados de la experimentación fue el hecho de que la dureza no hay sido un factor significativo para el rango de los factores evaluados. Es probable que si se hubiera incluido el factor de límite de fluencia en vez de la dureza, la ecuación DOE estimara un poco mejor la respuesta, sin embargo, aunque experimentalmente puede ser atractivo, no lo es en la práctica, ya que en los procesos de galvanizado la fluencia no es un objetivo final, sino más bien la dureza y esta última es la que se mide en cada bobina procesada.

5.2. Comparación del antes con el ahora

Con el fin de medir el impacto de la suavización en la práctica y comparar este resultado con las estimaciones de las ecuaciones DOE, se correrán los mismos ejemplos del capítulo 3, donde se comentaban las discrepancias que existían con las variaciones de ángulo de abrace y cambios en el signo de la expresión $(3H^2 - H_1^2)$. Estas comparaciones serán útiles para analizar las diferencias en las estimaciones de las pérdidas

Caso 1

En la tabla # 12 se muestran los resultados de correr el mismo ejemplo usando las ecuaciones anteriores (1, 2 y 3), la suavizada con Fuzzy (36) y la que resultó de la experimentación (49).

Variables	Escenario 1	Escenario 2
D	500	500
B	1,220	1220
H	1.60	1.60
Angulo (°)	44	45
D'	1000	500
C1D'/H	1.65	0.82
Pérdida con EDI	10	153
Pérdida con Fuzzy	66	152
Pérdida con DOE	26	26

D = 500 mm
 tf = 56 Kgf/mm² Acero laminado en frío sin recocido
 E = 20,000 Kgf/mm² Acero laminado en frío ASTM 1006
 b = 1.220 mm
 H = 1.70 mm

Tabla 12. Comparación de resultados sobre cálculo de pérdidas cuando se varía el espesor

Las ecuaciones EDI y la suavizada presentan grandes saltos con la variación de solo un grado en el ángulo de abrace. Pero se observa que la ecuación suavizada tiene un salto mucho menor que las EDI. Aunque se removi6 la discontinuidad con la ecuación suavizada, sigue existiendo una gran variación, ya que la ecuación anterior (EDI) plantea ese salto al definir D' en términos de los rangos de ángulo de abrace; obsérvese que D' y por lo tanto C1D'/H se disminuyen en un 50% al pasar de 44 a 45°. Es por esto que para evitar confusiones pensando que la ecuación suavizada tiene discontinuidades es mejor que en la práctica se defina una familia de curvas y ecuaciones para los diferentes rangos de ángulos de abrace. De todas maneras, en la práctica, los ángulos de abrace en líneas de proceso del acero plano, son mayores a 45 ° (ver figura 2)

Otro aspecto que llama la atención es la gran diferencia entre los valores de las pérdidas calculadas con las EDI y las calculadas con la ecuación suavizada (10 vs 66 Kgf) para el escenario 1. Esto se causa porque C1D'/H es igual a 1.65 y como se observa en la figura 32, este valor cae en la zona de discontinuidad de la ecuación EDI, por lo tanto el valor estimado con la ecuación suavizada es el correcto.

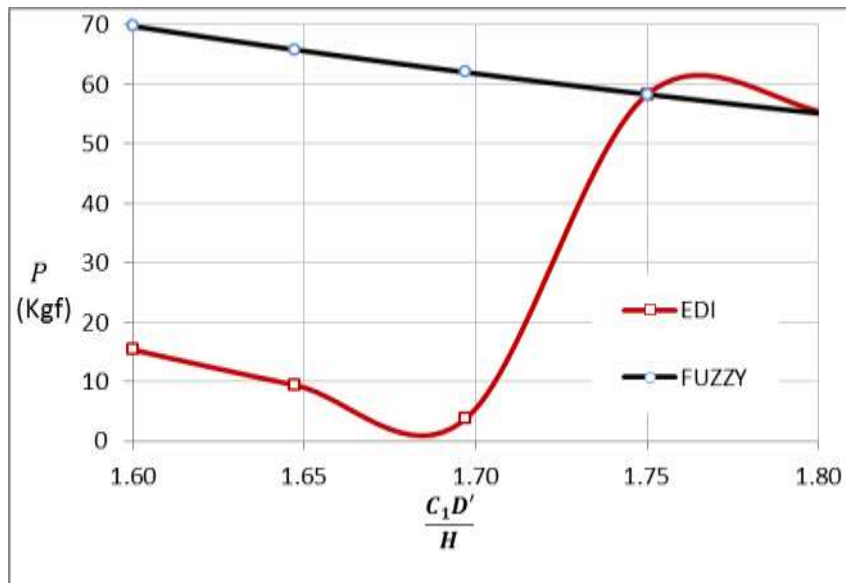


Figura 32. Ampliación de la zona de discontinuidad de las EDI

De otro lado, se observa que la estimación que se hizo con el modelo de regresión obtenido de la experimentación es mucho menor que la obtenida por la ecuación suavizada para el escenario 1, lo que representa un gran hallazgo, ya que es posible que se estén sobrevalorando las pérdidas y por lo tanto generando sobrecostos en motores, drives, reductores y consumo energético.

Caso 2

En la tabla # 13 se muestran los resultados de correr el mismo ejemplo usando las ecuaciones EDI, la Fuzzy y la DOE.

En el caso de la EDI con solo un cambio de 0.02 mm en el espesor, la pérdida sufre un descenso drástico hasta un valor casi nulo, aspecto que ya se caracterizó en el capítulo 1. Sin embargo con la ecuación suavizada esta discontinuidad desapareció y ahora se muestra un cambio razonable (de 58 a 60 Kgf).

La diferencia entre las estimaciones con la ecuación suavizada y la experimental siguen siendo considerables, pero se destaca el hecho que en ambas los pequeños cambios en el espesor están generando variaciones sensatas en la estimación de las pérdidas. En la próxima sección se plantearán unas posibles causas de esta diferencia.

Variables	Escenario 1	Escenario 2
D'	500	500
B	1220	1220
H	1.60	1.62
Tf	56	56
Angulo (°)	44	44
C1D'/H	1.72	1.75
Pérdida Antes	58	0.38
Pérdida con Fuzzy	58	60
Pérdida con DOE	23	24

D = 500 mm
tf = 56 Kgf/mm2 Acero laminado en frío sin recocido
E = 20,000 Kgf/mm2 Acero laminado en frío ASTM 1006
b = 1.220 mm
H = 1.6 mm

Tabla 13. Comparación de resultados sobre cálculo de pérdidas variando el espesor

5.3. Análisis de la diferencia entre los resultados de la DOE y la FUZZY.

Algo importante a resaltar de la experimentación es el hecho que 51 de las 60 condiciones experimentales, representaron esfuerzos superiores al límite de fluencia y por lo tanto la ecuación resultante opera prácticamente en el rango de las deformaciones plásticas. Las ecuaciones⁶ que gobiernan los estados elásticos y plásticos son:

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon, & \varepsilon \leq \frac{\sigma_E}{E}, \quad \text{Zona Elástica} \\ \sigma_E \left(\frac{E\varepsilon}{\sigma_E} \right)^n, & \varepsilon \geq \frac{\sigma_E}{E}, \quad \text{Zona Plástica} \end{cases} \quad (56)$$

Donde:

σ : Esfuerzo

E: Modulo de Young

ε : Deformación unitaria de la zona elástica

σ_E : Límite de fluencia

n: Coeficiente de endurecimiento por trabajo en frío

En la tabla del anexo 2 se pueden observar los valores de esfuerzo para cada condición experimental, teniendo en cuenta la ecuación (56) para acero laminado

⁶ Jacob Lubliner, Plasticity Theory. Revised Edition (PDF), University of California at Berkeley, Pearson Education, Inc., 2006

en frío con resistencia a la fluencia de entre 34 Kg/mm². El factor n que aplica para este tipo de aceros es 0.29⁷.

En la figura 33 se grafican comparativamente los esfuerzos calculados con la ecuación 56 (esfuerzo real) y los esfuerzos calculados asumiendo elasticidad en todo el rango de $\frac{C_1 D'}{H}$, lo cual no es tan válido pero muy útil para la conclusión que platearemos más adelante. En la figura 34 se grafican comparativamente las pérdidas calculadas con las ecuaciones FUZZY y DOE para el mismo rango de $\frac{C_1 D'}{H}$ que se utilizó en la figura 33.

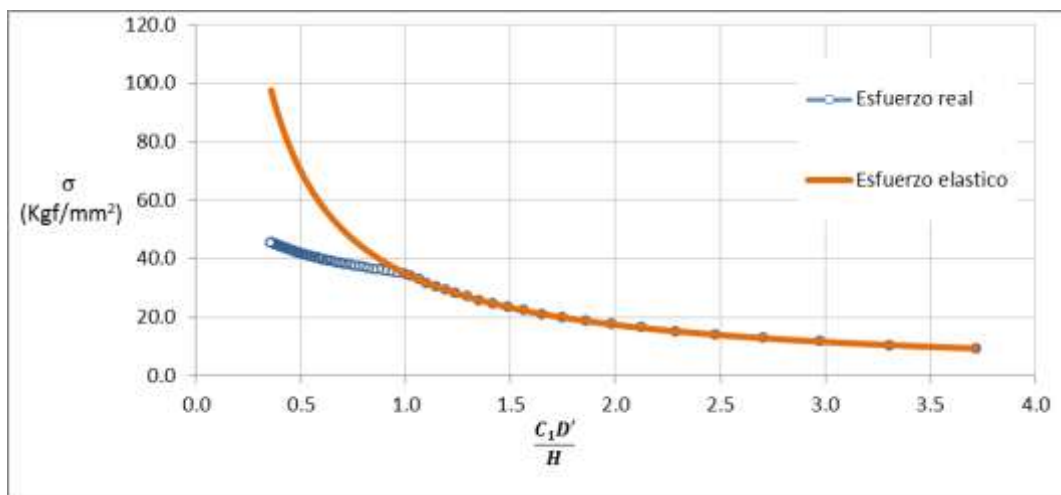


Figura 33. Gráfica comparativa de curvas con ecuaciones zona elástica y plástica

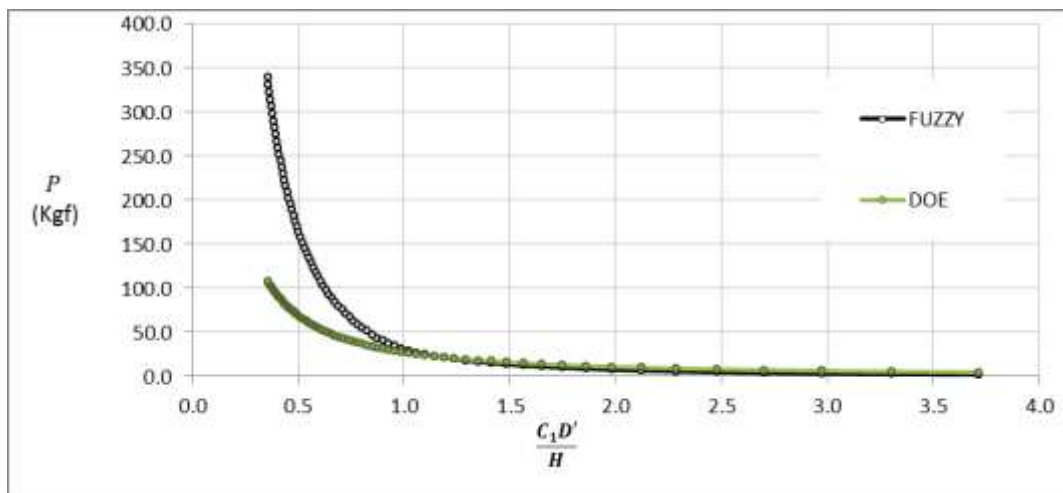


Figura 34. Gráfica comparativa de curvas para ecuaciones DOE y FUZZY

⁷ Usamah Saeed and Lenard J.G.; A Comparison of Cold Rolling Theories Based on the Equilibrium Approach; J. Engg. Mat. And Tech., Vol. 102, pp. 223–228, 1980.

Como se puede observar en ambas comparaciones realizadas en las figuras 33 y 34, las diferencias en las estimaciones son bastante considerables para los valores de $\frac{C1D'}{H}$ bajos donde existe plasticidad, pero para valores cercanos a 1.0 el comportamiento de las curvas que se comparan en cada gráfica son iguales en pendiente y valor, hasta el punto en que ambas curvas se superponen.

Lo anterior nos permite concluir que las ecuaciones suavizadas, están tomando un escenario elástico para valores de $\frac{C1D'}{H}$ pequeños y la ecuación obtenida experimentalmente se asume más a un escenario plástico.

5.4. Análisis de desviaciones en las ecuaciones

Es muy importante ahora analizar las ecuaciones que se han obtenido a la luz de sus desviaciones en la respuesta, con respecto a los valores observados en la experimentación. En la figura # 33 se muestran las desviaciones en un gráfico de dispersión, observándose que la ecuación suavizada presenta desviaciones exageradas y a todo el rango de las observaciones.

Además de la comparación gráfica que se muestra en la figura # 338, si se comparan las sumas de cuadrados del error para cada modelo, se encuentra que la de la ecuación experimental es seis (6) veces menor que la de la ecuación suavizada (37 vs 238).

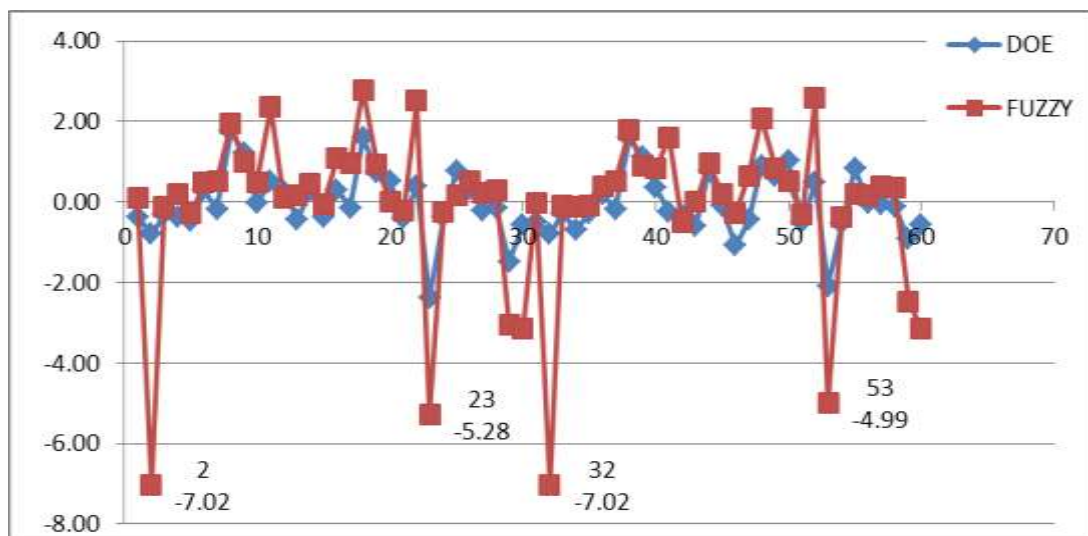


Figura 35. Grafico de Dispersión para desviaciones en respuesta de ecuaciones

Con los resultados de la presente investigación se logra un aporte muy importante para la industria de procesamiento del acero plano. Actualmente solo las empresas diseñadoras de equipos cuentan con software para la simulación y cálculo de los elementos motrices para el transporte de la cinta, que ha sido desarrollado por ellos mismos. En el caso de industrias fabricantes de acero la inversión no se justifica por la poca aplicabilidad, ya que en la mayoría de los casos los proyectos de nuevas líneas de se contrata el proyecto llave en mano. ACESCO S.A. tendrá una ventaja competitiva comparada con empresas de tamaño similar, ya que como ocurre en la actualidad los proyectos se ejecutan con una alta proporción de ingeniería interna.

5.5. Investigaciones futuras

Al concluir esta investigación se recomienda que a futuras investigaciones aborden las siguientes temáticas:

- Realizar experimentación incorporando el límite de fluencia como factor de análisis, con el fin de intentar mejorar el R^2 y contar con un modelo más robusto.
- Validar el modelo obtenido de la experimentación en una línea de proceso de acero plano.
- Modificar el diseño del prototipo para realizar pruebas con otros materiales como Aluminio.
- Realizar un modelo matemático desde el punto de vista de la energía de deformación y compararlo con el modelo experimental desarrollado en esta investigación.

ANEXO 1

APPLIED INDUSTRIAL CONTROL SOLUTIONS
ApICS LLC.

BENDING LOSS CALCULATIONS

BRIAN T. BOULTER, HARRY W. FOX

© ApICS ® LLC 2000

ABSTRACT

This report presents a mathematical model for estimating roll-by-roll bending losses and tension build-up required in strip material as it bends and straightens while traveling through a network of powered and unpowered rolls in a process line. The total horsepower required for the drag and drive bridles in strip process lines depends not only on process throughput parameters, such as tension set points and process line speed, but on the summation of the various losses encountered along the line. Methods are described for continuous tracking of strip fiber deformation on a roll-by-roll basis beginning at the process line entry section. Such an analysis of bending losses is desirable when encountering rolls of varying diameters, for which the steady-state analysis of the literature is no longer valid.

INTRODUCTION

An example strip process line shown in Figure 1, in which the material passes from an unwinder section, through a number of sections consisting of rollers of various sizes, to a terminating winder section. The straining of the material as the strip bends on the rolls and straightens between the rolls can require additional unrecoverable work by the drive motors, particularly whenever portions of the strip fibers undergo plastic deformation. Thus, a certain amount of bending loss, often reflected added tension build-up, can occur at each of the rollers.

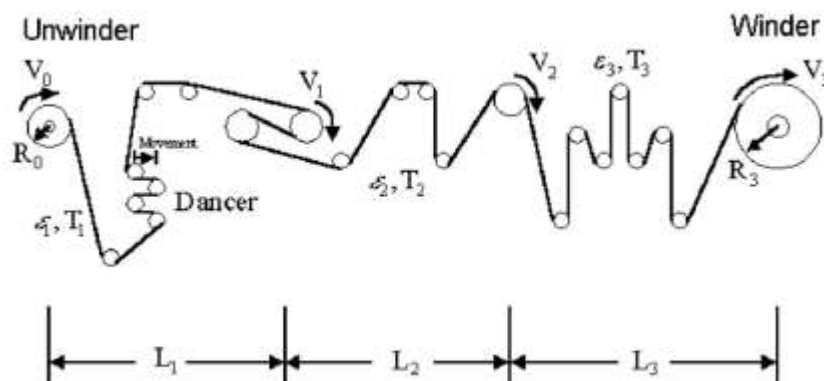


Figure 1. Example strip process line

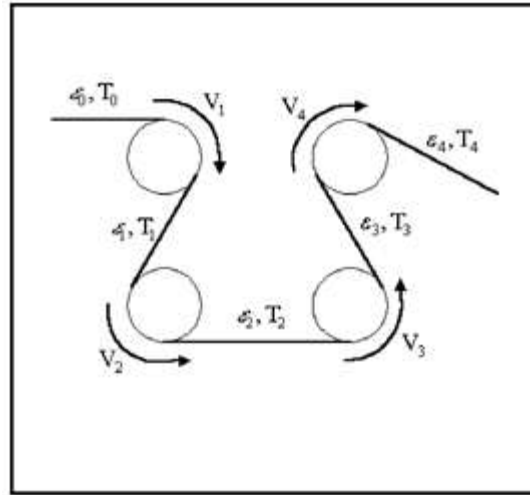


Figure 2. Example bridge (4-section) in a process line

Other investigators, primarily interested in tension leveling, have studied this bending process as it would apply to the steady-state case of passing over and under a series of rolls of the same radius. The bending losses reported represented that for the n -th pass from one roll to the next identical roll of reverse bend. Kinnavy [1] considered bending combined with tension high enough to elongate the center fiber, for an elastic, perfectly-plastic material. Patula [2], also for an elastic, perfectly-plastic material, considered bending with tension stress levels from zero to yield and identified five distinct (steady-state) behaviors, from completely elastic to completely plastic. Misaka and Masui [3] presented an experimental equation for the effective radius of curvature (when the strip does not conform with the roll) and an analysis of combined bending and tension for material exhibiting a linear work-hardening stress-strain characteristic. Smith [4] considered the increase in bending moment required when deforming an elastic, perfectly-plastic material as a measure of the added roll force due to the plastic work when straining the outside and inside fibers during bending.

The purpose of this paper is to remove the steady-state limitation inherent in the previous work, by presenting a computer model that simulates the bending and straightening process on a roll by roll basis. The model will be useful in the design of tension bridge systems.

The balance of this report is divided into the following five chapters (followed by the bibliography):

Chapter 1: Nomenclature

Chapter 2: Describes the basic features of the bending process and presents the fundamental equations to be used by the models in subsequent chapters.

Chapter 3: Presents a bending-loss model from the literature [2] which is based on a set of

algebraic equations that are valid for the special case of steady-state bending over rolls of identical diameter in alternating forward and reverse directions. The basis of the model is developed through a specific example illustrating a series of three bending and straightening operations.

Chapter 4 : Presents a numerical model of the bending process which is considered more general and more flexible than an algebraic model requiring steady-state conditions to be valid. The material deformations and any losses are determined and updated on a roll-by-roll basis.

Chapter 5 : Conclusions

CONCLUSIONS

A numerical model was developed for estimating roll-by roll bending losses and tension build-up required in strip material as it bends and straightens while traveling through a network of powered and unpowered rolls in a process line. It provides for the calculation of strip fiber deformation on a roll-by-roll basis beginning at the process line entry section, without restricting the analysis to steady-state or identical forward-reverse bending paths. Numerical model results agreed with results obtained from less-flexible algebraic-equation-based models, derived in this report and found in the literature.

www.apicsllc.com/apics/Sr_9/Sr_9s.htm

ANEXO 2. Tabla de resultados experimentales

Condición experimental	Diámetro (mm)	Angulo (°)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Dureza (HRB)	Pérdida (Kgf)	Esfuerzo fibra externa
1	600	50	90.0	0.60	80	0.90	20.0
2	228	50	90.0	1.16	80		43.8
3	600	50	90.0	1.16	80	2.75	35.7
4	600	50	34.1	1.16	80	1.29	35.7
5	600	50	90.0	1.16	80	2.58	35.7
6	600	50	90.0	1.16	80	3.35	35.7
7	972	50	90.0	1.16	80		23.9
8	600	50	90.0	1.16	80	4.81	35.7
9	400	29	60.0	1.46	88	3.64	40.8
10	400	29	60.0	0.86	72	1.16	36.5
11	800	72	60.0	1.46	72	4.35	35.3
12	600	10	90.0	1.16	80	1.09	35.7
13	600	50	90.0	1.16	65	2.64	35.7
14	600	50	90.0	1.16	80	3.33	35.7
15	400	72	120.0	0.86	88	3.55	36.5
16	800	29	120.0	1.46	72	3.09	35.3
17	800	72	120.0	0.86	88	2.78	21.5
18	800	72	60.0	0.86	72	3.48	21.5
19	600	50	90.0	1.16	80	3.82	35.7
20	600	50	145.9	1.16	80	4.66	35.7
21	600	50	90.0	1.16	80	2.66	35.7
22	600	90	90.0	1.16	80	5.39	35.7
23	400	72	120.0	1.46	72	5.59	40.8
24	800	29	120.0	1.46	88	2.40	35.3
25	600	50	90.0	1.16	95	3.85	35.7
26	600	50	90.0	1.16	80	3.39	35.7
27	800	29	60.0	0.86	88	0.68	21.5
28	400	29	120.0	0.86	72	1.68	36.5
29	400	72	60.0	1.46	88	3.66	40.8
30	600	50	90.0	1.72	80		38.8

31	600	50	90.0	0.60	80	0.77	20.0
32	228	50	90.0	1.16	80		43.8
33	600	50	90.0	1.16	80	2.80	35.7
34	600	50	34.1	1.16	80	0.96	35.7
35	600	50	90.0	1.16	80	2.79	35.7
36	600	50	90.0	1.16	80	3.26	35.7
37	972	50	90.0	1.16	80		23.9
38	600	50	90.0	1.16	80	4.65	35.7
39	400	29	60.0	1.46	88	3.53	40.8
40	400	29	60.0	0.86	72	1.53	36.5
41	800	72	60.0	1.46	72	3.60	35.3
42	600	10	90.0	1.16	80	0.47	35.7
43	600	50	90.0	1.16	65	2.47	35.7
44	600	50	90.0	1.16	80	3.84	35.7
45	400	72	120.0	0.86	88	3.82	36.5
46	800	29	120.0	1.46	72	1.70	35.3
47	800	72	120.0	0.86	88	2.48	21.5
48	800	72	60.0	0.86	72	2.78	21.5
49	600	50	90.0	1.16	80	3.72	35.7
50	600	50	145.9	1.16	80	5.17	35.7
51	600	50	90.0	1.16	80	2.56	35.7
52	600	90	90.0	1.16	80	5.46	35.7
53	400	72	120.0	1.46	72	5.88	40.8
54	800	29	120.0	1.46	88	2.26	35.3
55	600	50	90.0	1.16	95	3.90	35.7
56	600	50	90.0	1.16	80	3.03	35.7
57	800	29	60.0	0.86	88	0.84	21.5
58	400	29	120.0	0.86	72	1.72	36.5
59	400	72	60.0	1.46	88	4.22	40.8
60	600	50	90.0	1.72	80		38.8